



การศึกษาสมบัติเชิงกลของการผสมยาง HNBR/NBR  
เพื่อลดต้นทุนราคายางคอมเพาว์ด

โดย

นายอมร อาจินสมาจาร

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2553

การศึกษาศมบัติเชิงกลของการผสมยาง HNBR/NBR  
เพื่อลดต้นทุนราคาขายปลีก

โดย

นายอมร อาจินสมาจาร

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2553

Effect of HNBR/NBR Blending on Mechanical Properties for  
Cost Reduction

By

Mr.Amorn Ajinsamajan

An Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Development

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Thammasat University

2010

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง

ของ

นายอมร อาจินสมอาจารย์

เรื่อง

การศึกษาศมบัติเชิงกลของการผสมยาง HNBR/NBR เพื่อลดต้นทุนราคายางคอมเพาไรด์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 12 พฤษภาคม 2553

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิวัฒน์ มุตตุมระ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขชัย สุรพันธ์)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ตริทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร. อรุยา วิสกุล)

## บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองในครั้งนี้เป็นการศึกษาการผสมยางระหว่าง HNBR, NBR และ NBR/PVC ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 2 แบบ คือ Conventional และ EV system โดยทำการผสมยางด้วยเครื่องผสมยาง Kneader 3L แล้วนำไปทดสอบความเข้ากันได้ของยางผสม เช่น คุณสมบัติด้านรีโอโลยี (Rheological), ความร้อน (Thermal), ความทนทานต่อน้ำมัน (Oil Resistance), ความทนทานต่อโอโซน (Ozone Resistance), การผิดรูปจากการกด (Compression Set), การกระจายตัวของคาร์บอน (Carbon Dispersion) และ คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น Tensile Strength, Elongation at Break, Tear Strength and Hardness จากผลการศึกษาพบว่า การผสมยาง HNBR/NBR ที่อัตราส่วนผสม 90/10 ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV จะให้คุณสมบัติที่ดีที่สุด และเมื่อนำไปอบเป็นผลิตภัณฑ์วัด Dimension ก็ผ่านมาตรฐานตามที่ลูกค้ากำหนด

## Abstract

In this study, hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber (HNBR), nitrile butadiene rubber (NBR) and nitrile butadiene rubber/PVC (NBR/PVC) were cured by two vulcanization system : conventional and EV system. These compounds were blended at different ratios in a Kneader 3L. The melt miscibility and solid-state properties were investigated by rheological, thermal, oil resistance, ozone resistance, compression set, carbon dispersion and mechanical properties testing such as tensile strength, elongation at break, tear strength and hardness. The test result of 90/10 HNBR/NBR blend and EV vulcanization system is the best properties. The dimension of final product were acceptable follow customer's drawing.

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก รongศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย สุรพันธ์ ซึ่งได้สละเวลาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขรูปเล่มให้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูงและขอขอบคุณท่านคณะกรรมการสอบ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ และ รongศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ บริษัท ไอ อาร์ ซี (เอเชีย) รีเสิร์ช จำกัด คอยสนับสนุนให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ในการทำการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังว่าการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองฉบับนี้ คงมีประโยชน์ไม่มากนักน้อย สำหรับผู้ที่สนใจเกี่ยวกับเรื่องยาง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน หรือเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม

นายอมร อาจินสมาจาร  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
พ.ศ. 2553

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	(2)
Abstract .....	(3)
กิตติกรรมประกาศ .....	(4)
สารบัญ .....	(5)
สารบัญตาราง .....	(8)
สารบัญภาพประกอบ .....	(10)
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	4
1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน .....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 ยาง .....	6
2.2 พอลิเมอร์ผสม .....	12
2.3 การออกสูตรยาง.....	14
2.4 การผสมยางกับสารเคมี.....	17
2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง.....	22



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	29
3. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัตถุประสงค์.....	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	32
3.3 วิธีการทดลองและทดสอบ .....	37
3.4 การเรียกชื่อสูตรยางในการทดลอง.....	43
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1 สมบัติด้านการไหลและความหนืดของยาง .....	44
4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง .....	45
4.3 สมบัติเชิงกลของยาง.....	49
4.4 สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง .....	55
4.5 สมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยาง .....	59
4.6 สมบัติการผิดรูปที่เกิดจากการกดของยาง.....	66
4.7 สมบัติความทนทานต่อโอโซน .....	68
4.8 สมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำ .....	70
4.9 การทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์.....	72
4.10 การศึกษาต้นทุนราคายางคอมเปาว์.....	75
5. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	77
5.1 ผลของสมบัติด้านการไหลและความหนืดของยาง .....	77
5.2 ผลของลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง .....	77
5.3 ผลของสมบัติเชิงกลของยาง .....	78
5.4 ผลของสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง .....	79
5.5 ผลของสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยาง.....	79
5.6 ผลของสมบัติการผิดรูปที่เกิดจากการกดของยาง .....	80
5.7 ผลของสมบัติความทนทานต่อโอโซน .....	80
5.8 ผลของสมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำ .....	80

5.9 ผลของการทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์.....	80
5.10 ผลของการศึกษาต้นทุนราคาขายคอมพิวเตอร์.....	81
5.11 ข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....	82
ประวัติการศึกษา.....	84

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ปริมาณการใช้ยางคอมเพาเวิร์ด HNBR (1 ม.ค – 31 ธ.ค 2551) .....	2
1.2	ระยะเวลาการดำเนินงาน .....	5
2.1	ชนิดและโครงสร้างของโมโนเมอร์ในการสังเคราะห์ยาง .....	7
2.2	แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารเคมีต่างๆ .....	16
3.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง .....	31
3.2	สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ระบบ EV .....	38
3.3	สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ระบบ CV .....	38
3.4	สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ระบบ EV .....	39
3.5	สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ระบบ CV .....	39
4.1	ค่าความเหนียวของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	44
4.2	ลักษณะการวัลคาไนซ์ยางผสม HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	46
4.3	ลักษณะการวัลคาไนซ์ยางผสม HNBR กับ NBR ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	46
4.4	ค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	49
4.5	ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	51
4.6	ค่าความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	52
4.7	ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	54
4.8	การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ 100°C .....	55
4.9	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ 100°C .....	57
4.10	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ 100°C .....	58
4.11	การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ หลังจากแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C .....	60
4.12	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ หลังจากแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C .....	61

4.13	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนืดต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆหลังจากแช่น้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C .....	63
4.14	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ หลังจากแช่น้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C .....	64
4.15	ค่าการผิดรูปจากการกดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	66
4.16	การกระจายตัวเขม่าดำของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	70
4.17	ขนาดของผลิตภัณฑ์ .....	73
4.18	ราคาของคอมเปา์วต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	75

## สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของยาง NBR .....	8
2.2	โครงสร้างของยาง HNBR.....	11
2.3	เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง.....	18
2.4	เครื่องผสมยางระบบปิด.....	19
2.5	การผสมสารเคมีเข้าไปในยาง .....	20
2.6	ขั้นตอนการผสมยางและสารเคมี.....	22
2.7	ลักษณะการคงรูปของยางที่ได้จากเครื่อง Mooney Viscometer .....	24
2.8	ลักษณะกราฟการคงรูปของยางคอมปานด์ที่ได้จากเครื่องทดสอบรีโอมิเตอร์	25
3.1	เครื่องผสมยางแบบปิด.....	32
3.2	เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง.....	32
3.3	เครื่องอัดน้ำ.....	33
3.4	เครื่องรีโอมิเตอร์ .....	33
3.5	เครื่องมูนีวิสโอมิเตอร์.....	34
3.6	เครื่องวัดการกระจายตัวของเขม่าดำ .....	34
3.7	เครื่องวัดความแข็ง .....	35
3.8	เครื่องทดสอบแรงดึง .....	35
3.9	เครื่องทดสอบโอโซน .....	36
3.10	ตู้ Oven.....	36
3.11	ชุดทดสอบการผิดรูปที่เกิดจากการกด .....	37
4.1	แสดงค่าความหนืดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	45
4.2	ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	47
4.3	ค่า 10% Cure Time (T10) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	47
4.4	ค่า 90% Cure Time (T90) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	48
4.5	ค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	50
4.6	ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	51
4.7	ค่าความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	53

4.8	ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	54
4.9	การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ 100°C.....	56
4.10	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ ที่ 100°C .....	57
4.11	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ ที่ 100°C.....	59
4.12	การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ หลังจากแช่ใน น้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	60
4.13	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ หลังจากแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C .....	62
4.14	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ หลังจากแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	63
4.15	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ หลังจาก แช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	65
4.16	ค่าการผิดรูปจากการกดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	67
4.17	ความทนทานต่อไอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	68
4.18	ความทนทานต่อไอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	68
4.19	ความทนทานต่อไอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	69
4.20	ความทนทานต่อไอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	69
4.21	การกระจายตัวเขม่าดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	71
4.22	การกระจายตัวเขม่าดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	71
4.23	การกระจายตัวเขม่าดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	71

4.24	การกระจายตัวเขม่าดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	72
4.25	การวัดขนาดของผลิตภัณฑ์ .....	74
4.26	รูปตัวอย่างผลิตภัณฑ์ .....	74

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

สภาพปัจจุบันปี 2552 ปริมาณการผลิตยางทั้งหมดของโลกมีทั้งสิ้น 23,769 ล้านตัน โดยแบ่งเป็นยางสังเคราะห์ประมาณ 13,661 ล้านตันและยางธรรมชาติประมาณ 10,108 ล้านตัน ซึ่งสัดส่วนปริมาณการผลิตยางทั้งหมดของโลกส่วนใหญ่ร้อยละ 57.47 เป็นยางสังเคราะห์ ที่เหลือร้อยละ 42.53 เป็นการผลิตยางธรรมชาติ การใช้อย่างของโลกมี การใช้อย่างสังเคราะห์มากกว่ายางธรรมชาติ แนวโน้มการใช้ยางสังเคราะห์มากกว่าการใช้ยางธรรมชาติในสัดส่วนร้อยละ 60 : 40 ซึ่งสัดส่วนการใช้ยางสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากผู้ใช้อย่างส่วนใหญ่สามารถผลิตและส่งออกได้จึงเอื้อต่อการบริหาร การจัดการในเรื่องของสต็อกและวัตถุดิบ ประกอบกับราคาของยางสังเคราะห์ค่อนข้างมีเสถียรภาพมากกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากผลผลิตมีปัจจัยบางอย่างที่ไม่สามารถควบคุมได้ ประเทศผู้ส่งออกยางสังเคราะห์ที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา เยอรมนี และฝรั่งเศส เป็นต้น ซึ่งประเทศดังกล่าวเป็นทั้งผู้ผลิต ผู้ใช้ และผู้ส่งออกยางสังเคราะห์ ในส่วนของยางธรรมชาติ ผู้ส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ ประเทศไทย อินโดนีเซีย มาเลเซีย และเวียดนาม ส่วนประเทศผู้ใช้อย่างธรรมชาติที่สำคัญ ได้แก่ จีน สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากยางภายในประเทศไทย ส่วนมากนิยมใช้ยางสังเคราะห์ในการผลิตได้แก่ ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ยางคลอโรพรีน (CR) ยางบิวไทล์ (IIR) ยางบิวตาไดอีน (BR) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ยางซิลิโคน (Q) และ ยางไนไตรล์ (NBR) เป็นต้น ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้งานขึ้นกับผลิตภัณฑ์และสภาวะของการใช้งานเป็นหลัก เช่น การใช้งานกับความร้อน ตัวทำละลายที่เป็นกรด-ด่าง หรือ การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เป็นต้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์มีความต้องการยางที่มีคุณสมบัติดีเยี่ยมและสามารถทนทานต่อความร้อน น้ำมัน สิ่งแวดล้อม ในขณะที่เดียวกันคุณสมบัติเชิงกลก็ดีด้วย ทางบริษัทมีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสทั้งน้ำมันและความร้อนสูง ซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้ยางสังเคราะห์ชนิดพิเศษที่มีราคาค่อนข้างแพงมากซึ่งก็คือ ไฮโดรเจนเนตอะโครโลไนไตรล์บิวตาไดอีน หรือยาง HNBR ส่งผลให้ต้นทุนราคาของยางคอมปาวด์แพงมากเช่นกัน ปริมาณการใช้ยางคอมปาวด์ HNBR แสดงดังตารางที่

1.1



## ตารางที่ 1.1

ปริมาณการใช้ยางคอมเปาว์ด HNBR (1 ม.ค – 31 ธ.ค 2551)

เดือน	ปริมาณการใช้ (ก.ก/เดือน)	มูลค่า (บาท/เดือน)
มกราคม	196.40	113,055.70
กุมภาพันธ์	160.60	92,447.78
มีนาคม	143.65	82,668.38
เมษายน	142.22	81,866.95
พฤษภาคม	122.09	70,281.04
มิถุนายน	153.10	88,131.64
กรกฎาคม	241.41	138,965.25
สิงหาคม	166.20	95,671.37
กันยายน	168.60	97,052.90
ตุลาคม	129.00	74,257.56
พฤศจิกายน	162.20	93,368.81
ธันวาคม	175.21	100,857.88
เฉลี่ย	163.38	94,053.77

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนราคาของยางคอมเปาว์ด HNBR ลง ทำได้โดยการผสมกับยางที่ราคาถูกกว่า การนำยางสองชนิดมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นยางผสม (Rubber Blend) การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้ยาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมที่ได้มีคุณสมบัติไม่ดี ดังนั้นการที่ผสมยางสองชนิดเข้าด้วยกัน ต้องคำนึงถึงสภาพของความเข้ากันได้ (Compatibility) ของยางที่จะนำมาผสมกัน ยางที่มีคุณสมบัติเชิงกลและสภาพของความเข้ากันได้ใกล้เคียงกับยาง HNBR คือ ยาง NBR/PVC และยาง NBR ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการศึกษาอัตราส่วนการผสมของยางทั้งสองชนิดนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสม (Rubber Blend) ระหว่าง HNBR กับ NBR /PVC และ HNBR กับ NBR

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติด้านความทนทานต่อความร้อน น้ำมัน และโอโซนของยางผสม (Rubber Blend)

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติการผิดรูปที่เกิดจากการกดของยางผสม (Rubber Blend)

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติด้านความสามารถของการไหล และความหนืด (Rheology) ของยางผสม (Rubber Blend)

1.2.5 เพื่อศึกษาระบบการวัลคาไนซ์ในยางผสม (Rubber Blend)

1.2.6 เพื่อศึกษาสมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำในยางผสม (Rubber Blend)

1.2.7 เพื่อลดต้นทุนราคาของคอมเปาว์ด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ในการทดลองใช้สูตรยางคอมเปาว์ดความแข็ง 80 JIS A ที่อบผลิตภัณฑ์เป็น Rubber insulator

1.3.2 ในการทดลองใช้ยาง 3 ชนิด คือ HNBR, NBR/PVC และ NBR

1.3.3 แปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR/PVC และ HNBR กับ NBR ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับ และแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV

1.3.4 การเตรียมยางผสม (Rubber Blend) จะทำการผสมยางด้วยเครื่อง Kneader 3L และวัดระดับการกระจายตัวของเขม่าดำ

1.3.5 ทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่อง Hardness Tester, ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation at Break) และ ความทนทานต่อการฉีกขาด โดยใช้เครื่อง Autograph Machine, ทดสอบความทนทานต่อโอโซนโดยใช้เครื่อง Ozone Machine, ทดสอบการไหลและความหนืดโดยใช้เครื่อง Mooney Viscometer, ทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางโดยใช้เครื่อง Rheometer, ทดสอบการกระจายตัวเขม่าดำในยางโดยใช้เครื่อง Dispergrader, ทดสอบความทนทานต่อความร้อนโดยใช้เครื่อง Geer Oven, ทดสอบการผิดรูปที่เกิดจากการกด

1.3.6 อบขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Compression Molding)

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ผสมยางคอมปาวด์ระหว่างยาง HNBR กับ NBR/PVC และยาง HNBR กับ NBR ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับ และแปรระบบการวัลคาไนซ์ ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล, ทดสอบความทนทานต่อน้ำมัน ความร้อน และโอโซน, ทดสอบการไหลและความหนืด, ทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง, ทดสอบสมบัติการผิดรูปที่เกิดจากการกดยาง, วัดระดับการกระจายตัวของเขม่าดำของยางผสม

1.4.3 นำผลทดสอบที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุด โดยเทียบกับสูตรยางมาตรฐาน และ มาตรฐานของลูกค้าที่กำหนด

1.4.4 นำยางคอมปาวด์ที่ได้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

1.4.5 ศึกษาต้นทุนราคายางคอมปาวด์

1.4.6 จัดทำรูปเล่มการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง

## 1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2  
ระยะเวลาดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน (เดือน)									
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	■	■								
2.ผลสมยงคอมเปา์วดีที่อัตราส่วนต่างๆ และแปรระบบการวัลคานไนซ์		■	■	■						
3.นำยงคอมเปา์วดีที่ได้ไปทดสอบ			■	■	■	■	■			
4.ทดลองอบผลิตภัณฑ์				■	■	■	■	■		
5.ศึกษาต้นทุนราคาขงคอมเปา์วดี								■	■	
6.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง				■	■	■		■	■	■
7.จัดทำรูปเล่ม								■	■	■

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้สูตรยงที่มีต้นทุนราคาขงคอมเปา์วดีที่ถูกลง
- 1.6.2 ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลขงยงผสมระหว่าง HNBR, NBR/PVC และ NBR
- 1.6.3 เป็นแนวทางในการศึกษาการทำยงผสมชนิดอื่นๆ
- 1.6.4 เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับผู้สนใจพัฒนาสูตรยงทนน้ำมันและความร้อน

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ยาง (Rubber)

ยางจัดเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการที่วัสดุชนิดอื่นๆ ไม่สามารถเปรียบเทียบเคียงได้โดยเฉพาะสมบัติความยืดหยุ่น (Elasticity) คือ เมื่อให้แรงดึงยางจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิม และหากปล่อยแรงออกยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิม นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติเด่นอื่นๆ อีก เช่น มีความเหนียว (Toughness) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ มีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นดี เช่น โลหะและสิ่งทอ (เส้นใย ผ้าใบ ฯลฯ) ทำให้สามารถนำยางไปใช้ในงานวิศวกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ข้อเสียที่ทำให้ยางดิบไม่อาจจะนำไปใช้งานได้โดยตรง ได้แก่ ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอิลาสติก, ยางดิบเป็นเทอร์โมพลาสติก, ยางดิบมีความแข็งแรงต่ำ, ยางดิบมีราคาค่อนข้างแพง และยางดิบละลายง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด

ผลิตภัณฑ์ยางแต่ละชนิดจะมีสภาวะของการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ผลิตภัณฑ์บางประเภทต้องการสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน เช่น ยางโอริง ผลิตภัณฑ์บางประเภทต้องการสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพของอากาศ โอโซน และแสงแดด เช่น ยางขอบกระจกรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์บางประเภทต้องการสมบัติความต้านทานการขัดถูสูงๆ เช่น ดอกยางรถยนต์ เป็นต้น ดังนั้น การเลือกชนิดของยางให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานของผลิตภัณฑ์นอกจากจะต้องพิจารณาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของยางแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ราคาของยางดิบ เป็นต้น

ยางสังเคราะห์ไม่ได้หมายความว่าความยืดหยุ่นที่มีลักษณะทางเคมีและสมบัติคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene, IR) เท่านั้น แต่ยังรวมถึงยางชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมี สาเหตุสำคัญที่ผลักดันให้เกิดการริเริ่มค้นคว้าการผลิตยางสังเคราะห์จนขยายมาเป็นการผลิตเชิงการค้า ได้แก่ ปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ในช่วงสงครามของประเทศ, ราคาที่ไม่แน่นอนของยางธรรมชาติ และ ความต้องการยางที่มีคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น มีความทนทานต่อน้ำมัน สารเคมี และความร้อนสูงๆ เป็นต้น การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตโมโนเมอร์

และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของโมโนเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันเราจะเรียกว่า โฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymer) เช่น ยางโพลิบิวตาไดอีน (Polybutadiene, BR) หรือยางโพลิไอโซพรีน (Polyisoprene, IR) เป็นต้น แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดอาจจะประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคโพลิเมอร์ (Copolymer) เช่น ยางสไตรีน บิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) เป็นต้น ชนิดและโครงสร้างของโมโนเมอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

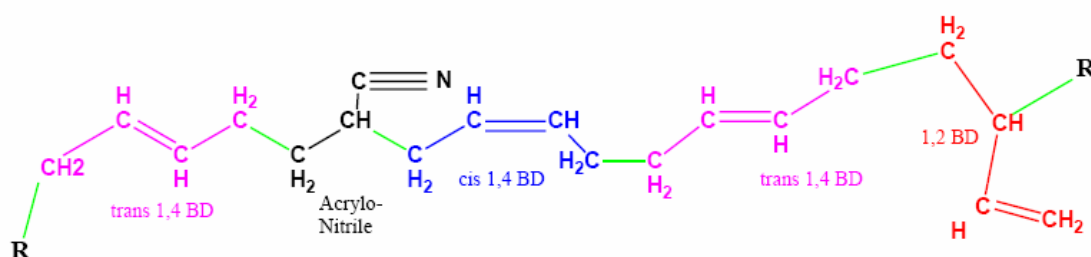
ตารางที่ 2.1

ชนิดและโครงสร้างของโมโนเมอร์ที่สำคัญในการสังเคราะห์ยาง (พงษ์ธร, 2548)

โมโนเมอร์	โครงสร้าง	จุดเดือด (C)
Ethylene	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	-104
Propylene	$\text{CH}_2 = \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}$	-50
Isobutylene	$\text{CH}_2 = \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}$	-6
1,3-butadiene	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH} = \text{CH}_2$	-4.5
Isoprene	$\text{CH}_2 = \underset{\text{CH}_3}{\text{C}} - \text{CH} = \text{CH}_2$	34
Chloroprene	$\text{CH}_2 = \underset{\text{Cl}}{\text{C}} - \text{CH} = \text{CH}_2$	59
Styrene (vinylbenzene)	$\text{CH}_2 = \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}$	145
Acrylonitrile	$\text{CH}_2 = \underset{\text{C} \equiv \text{N}}{\text{CH}}$	77

### 2.1.1 ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR)

ยาง NBR เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile Monomer) และ บิวตาไดอีน (Butadiene Monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ 18-51% จาก โครงสร้างของโมเลกุล (ภาพที่ 2.1) จะเห็นว่าในส่วนของอะคริโลไนไตรล์จะมีหมู่ฟังก์ชัน -CN อยู่ทำให้โมเลกุลของยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีคุณสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมัน ปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ในขณะที่ส่วนของบิวตาไดอีนที่มีอยู่ในโมเลกุลจะเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นและเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลจะเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาครอสลิงก์



ภาพที่ 2.1

โครงสร้างของยาง NBR

สมบัติของยาง NBR จะแปรผันโดยตรงตามสัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุลโดยทั่วไป เมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรล์สูงขึ้นจะทำให้สมบัติของยาง NBR เปลี่ยนไป ดังนี้ คือ ความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น, การกระเดื่อง กระดองต่ำลง, ค่า Compression Set ต่ำลง, อัตราการซึมผ่านของก๊าซลดลง, สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำต่ำลง, ความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงขึ้น, ความทนทานต่อการขีดข่วนสูงขึ้น, ความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และ ความหนาแน่นสูงขึ้น

#### 2.1.1.1 สมบัติทั่วไป

ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยาง NBR จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางธรรมชาติ และยาง SBR และเนื่องจากความยืดหยุ่นของยางจะต่ำลงหากยางมีปริมาณของอะคริโลไนไตรล์สูงขึ้น ดังนั้น ถ้าต้องการยาง NBR ที่มีความยืดหยุ่นสูงก็ควรเลือกใช้ยางเกรดที่มีปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ต่ำๆ และระหว่างการผสมเคมียางควรใช้สารทำให้ยางนิ่มในกลุ่มของอีเทอร์หรือเอสเทอร์หรือใช้ขี้เถ้าเกรดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ๆ เช่น N770 เป็นต้น นอกจากนี้ปริมาณของ

อะโครโลไนไตรล์แล้ว ค่าความยืดหยุ่นของยางชนิดนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยาง NBR ที่มีปริมาณของอะโครโลไนไตรล์สูงจะมีความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็ว และมีสมบัติการกระด้างกระดองสูงขึ้น

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) เนื่องจากยาง NBR ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (เช่นเดียวกับยาง SBR) ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงมีความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรงเข้าช่วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) ยาง NBR มีความต้านทานต่อการขัดถูสูง หากมีการออกสูตรการผสมเคมีที่ดีและมีการใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย ยางคงรูปที่ได้จะมีความทนทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติและยาง SBR ที่มีสูตรการผสมเคมีเหมือนกันประมาณ 30% และ 15% ตามลำดับ

ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Properties) ยาง NBR มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติและ SBR โดยทั่วไปความสามารถทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนจะขึ้นกับสูตรการผสมเคมี ยาง ตัวอย่างเช่น การใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ หรือ การคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์หรือการใช้ซิลิกาพร้อมกับไซเลน หรือการใช้เขม่าดำเกรดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ก็ล้วนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนทั้งสิ้น นอกจากนี้ การใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น TMQ ร่วมกับ MBI ก็จะช่วยทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ยาง NBR จะทนทานต่อความร้อนได้ดี แต่ยางชนิดนี้ไม่ทนทานต่อโอโซน และสภาพอากาศจึงต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น P-phenylene Diamine ลงไปเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของยาง

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and Chemical Resistance) เนื่องจากยาง NBR เป็นยางที่มีความเป็นขั้วสูงจึงทนต่อน้ำมัน (ทั้งน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันเชื้อเพลิง) น้ำ และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วอื่นๆ ได้ดี แต่ยางจะไม่ทนต่อ กรดแก่และของเหลวที่มีขั้ว เช่น คีโตน เอสเทอร์ ตัวทำละลายที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (Chlorinated Solvent) และตัวทำละลายที่มีวงแหวนไฮโดรคาร์บอนมากๆ (Highly Aromatic solvent) ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วั้ระดับความทนทานต่อน้ำมัน และสารเคมีของยาง NBR นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอะโครโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุลแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสูตรของการผสมสารเคมียางด้วย โดยเฉพาะปริมาณของสารตัวเติมที่มีอยู่ในโมเลกุลและปริมาณของสารทำให้ยางนิ่มรวมไปถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงอีกด้วย



การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Flexibility) เนื่องจากยาง NBR มีอุณหภูมิกการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับยางชนิดอื่นๆ ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีข้อจำกัดทางด้านการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เพราะว่ายางจะสูญเสียสมบัติการหักงอ หรือสูญเสียความยืดหยุ่นได้หากนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมากๆ การเติมสารทำให้ยางนิ่มกลุ่มเอสเทอร์ จะช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยาง NBR แต่สารชนิดนี้จะทำให้สมบัติเชิงกลและความทนทานต่อความร้อนด้อยลง

ความเป็นฉนวน (Insulation) ยาง NBR มีความเป็นขั้วสูงจึงมีความเป็นฉนวนค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังเพียงพอสำหรับการผลิตปลอกหุ้มสายเคเบิลในกรณีที่ต้องการสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมบางชนิด เช่น คาร์บอนที่นำไฟฟ้า ลงไปในปริมาณที่มากเกินไป ก็ทำให้ยาง NBR เป็นยางที่นำไฟฟ้าได้

อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) โดยทั่วไปยาง NBR มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก โดยเฉพาะเกรดที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์สูงๆ จะมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกับยางบิวไทล์ โดยทั่วไป อัตราการซึมผ่านของก๊าซนอกจากขึ้นกับเกรดของยางแล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมในยาง รวมถึงความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง เป็นต้น

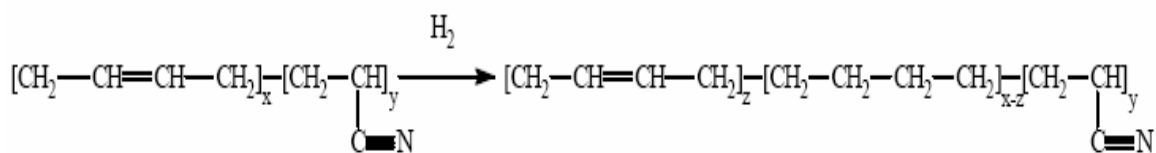
อุณหภูมิของการทำงาน (Service Temperature) ยาง NBR มีช่วงอุณหภูมิกการใช้งานตั้งแต่ประมาณ  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับยางที่ใช้อุณหภูมิต่ำอย่างต่อเนื่องสูงถึง  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับยางที่ไม่ได้ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง

#### 2.1.1.2 การใช้งาน

ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสัมผัสกับน้ำมันทนทานต่อความร้อนและความต้านทานต่อการขูดถูได้ดี ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยางที่ทำจากยาง NBR ได้แก่ ประเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุภาชนะ ยางเคลือบลูกกอล์ฟ รองเท้าบูท พื้นและสันรองเท้า เป็นต้น

### 2.1.2 ยางไฮโดรเจนเนตอะคริโลไนไตรล์บิวตาไดอิน (Hydrogenated Acrylonitrile - Butadiene Rubber, HNBR)

ยาง HNBR ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนเนชัน (Hydrogenation) ของยาง NBR ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ทำให้ยางชนิดนี้มีสายโซ่หลักเป็นพอลิเมทิลีน (Polymethylene) ที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่เพียงเล็กน้อย ยางชนิดนี้จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (รวมถึงน้ำร้อนและไอน้ำ) สภาพอากาศ รังสีที่มีพลังงานสูง และ โอโซนสูงมาก (ใกล้เคียงกับยาง EPDM) ส่วนหมู่ไนไตรล์ (-CN) ซึ่งเป็นกึ่งกำบังจะทำให้ยางทนทานต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.2

โครงสร้างของยาง HNBR

#### 2.1.2.1 สมบัติทั่วไป

ยาง HNBR ในเชิงการค้าแบ่งออกเป็น 2 เกรดหลักๆ ได้แก่ 1) ยางเกรดที่มีปริมาณที่มีพันธะคู่อยู่น้อยมาก (น้อยกว่า 1% ของพันธะคู่ที่เคยมีอยู่เดิมในยาง NBR) ซึ่งสามารถทำให้ยางคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์เท่านั้นและ 2) ยางเกรดที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมากโดยมีค่าเฉลี่ย (5-10% ของพันธะคู่ที่เคยมีอยู่เดิม) ซึ่งสามารถทำให้ยางคงรูปได้ด้วย เพอร์ออกไซด์และ กำมะถัน แต่การคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีค่า Compression Set และมีความทนทานต่อความร้อนที่ดีกว่าการคงรูปด้วยกำมะถัน สำหรับยาง HNBR เกรดที่มีพันธะคู่อยู่น้อยมากหรือไม่มีพันธะคู่เลยเมื่อได้รับการคงรูปแล้ว จะมีคุณสมบัติเด่นหลายประการคือ มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน น้ำมันร้อน ออกซิเจน โอโซน สารเคมีต่างๆ รวมถึงน้ำมันที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยางเกรดนี้ยังมีความทนทานต่อแรงดึงสูง มีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดี และความต้านทานต่อการขีดถูสูงอีกด้วย เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหลายๆ ยางชนิดนี้ก็สามารถรักษาสมบัติเชิงกลได้ดีกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ยาง HNBR เกรดนี้จึงเป็นคู่แข่งที่สำคัญของยางฟลูออโรคาร์บอน สำหรับยาง HNBR ที่มีพันธะคู่อยู่มาก พันธะคู่ที่มีอยู่จะทำให้สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศ (ออกซิเจน โอโซน และแสงแดด) ลดลงอย่างรวดเร็ว

### 2.1.2.2 การใช้งาน

ยาง HNBR มีสมบัติทั่วไปอยู่ระหว่างยาง NBR และยางฟลูออโรคาร์บอน เนื่องจากยางชนิดนี้มีราคาสูง จึงนิยมใช้แทนยาง NBR เฉพาะในกรณีที่ต้องการใช้งานในสภาวะที่รุนแรงหรือที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น ยางชนิดนี้มีข้อดีเหนือกว่ายางฟลูออโรคาร์บอนคือมีความทนทานต่อสารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นด่างได้ดี จึงนิยมใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยางที่ใช้ในแท่นขุดเจาะน้ำมัน

## 2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous Matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นแล้ว จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (Energy Factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

### 2.2.1 กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (Stress Concentration) จากดิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (In-situ Chemical Reaction) เพื่อปรับปรุงแรง

ดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างพื้นฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

### 2.2.2 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้เกิดพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

1) การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Miscibility) ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (Free Energy of Mixing)

2) การเติมบล็อกหรือการกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft Copolymers) การเติมบล็อกหรือการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการได้ตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้ คือ บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์, ไบบล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์, ไบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

3) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of Functional/Reactive Polymers) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมบ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน กับ พอลิเมอร์ชนิดที่สองได้กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือ โดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิไอโอฟีนส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มี

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอสเตอโรกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสม ที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

4) การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ Grafting Polymerization) การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม หรือ Reactive Blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ การนำองค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาตัดแปรงเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ ถึงแม้ว่าในบางครั้งของการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ Reactive Blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่องเช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single-Screw Extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-Screw Extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิและสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

### 2.3 การออกสูตรยาง (Formulation Design)

การออกสูตรยางเป็นสิ่งสำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสม หรือคุ้มค่ากับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะว่าต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ดังนี้

#### 2.3.1 ยาง (Rubber)

การออกสูตรยางจะต้องรู้สมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดี กล่าวคือต้องรู้ข้อดีและข้อเสียของยางที่จะนำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดีคือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (pure gum) ดีมาก นั่นคือ ไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดี ในขณะที่เดียวกัน ยาง EPDM มีความแข็งแรงของน้ำยางล้วนๆ สู้อย่างธรรมชาติไม่ได้ แต่มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและสภาพอากาศที่ดีกว่า เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิด และยังมีผลต่อการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

### 2.3.2 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “คงรูป” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ยางสุก” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

### 2.3.3 สารป้องกันยางเสื่อม (antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกปัจจัยต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจน ทำลายให้เสื่อมสภาพการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl (-p-cresol))

### 2.3.4 สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing Filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon Black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert Filler or Non-Reinforcing Filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.3.5 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing Aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนิ่มในระหว่างการผสม ได้แก่ พวกน้ำมัน (Oils) และสารเคมีย่อยยาง (Peptizer) เช่น pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหยุ่นตัว (Nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกิ้งยาก สารพวกนี้ ได้แก่ Factice เป็นต้น

### 2.3.6 สารกลุ่มอื่น ๆ (Miscellaneous Ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย เช่น การใช้สารหน่วง (retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้ยางที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วงได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น, สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางพองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น, สารทำให้เกิดสี (pigments) อาจเป็นสีอนินทรีย์ เช่น cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสี อนินทรีย์

การออกสูตรยางจะกำหนดปริมาณสารต่างๆ ในสัดส่วนต่อยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) และเรียกเป็น phr หรือ pphr (part per hundred of rubber)

#### ตารางที่ 2.2

แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารเคมีต่างๆ (พงษ์ธร, 2548)

สมบัติที่ต้องการ	สารเคมี	ปริมาณการใช้ (phr)
สมบัติความยืดหยุ่น (elasticity)	สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing crosslink agents)	1-3.5
	สารกระตุ้น (activator)	1-5
	สารเร่ง (accelerator)	0.5-2.5
ป้องกันยางเสื่อมอันเนื่องมาจาก O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	สารป้องกันยางเสื่อม เช่น 6 PPD, Flectol H, Antioxidant 2246, Wingstay L, Vulkanox MB	1-4
เสริมความแข็งแรงให้ยาง	สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น เขม่าดำ (Carbon black) เขม่าขาว (Silica)	10-100
ลดความหนืด (viscosity) ของยางดิบ	บดให้นิ่ม (Mastication) และ/หรือเติมสารย่อยยาง (Chemical peptizer)	0.1-1.5
เชื่อมติดผ้า โลหะ กระเบื้อง	สารพวกเป็นตัวเชื่อม (bonding agent) และต้องทำ ความสะอาด หรือมีวิธีการพิเศษ treat ผิวของสิ่งที่ ต้องการเชื่อม	2-10

สี	สีอนินทรีย์ หรือสีอินทรีย์	ตามความเข้มที่ต้องการ
ลดต้นทุน	สารตัวเติมชนิดราคาถูก ยางรีเคลม เศษยางคงรูป	10-200 , 10-100, 5-50 05.-20
ฟองพูน (cellular structure)	สารฟู พวกอินทรีย์สารหรืออนินทรีย์สาร	5-30
ลดอันตรายจากการติดไฟ (self extinguishing)	สารลดการติดไฟ เช่น พวก phosphates, antimony salts, halogenated organics, borates (antimonytrioxide and chlorinated wax – มักใช้กับยางธรรมชาติ)	1-20
ฉนวนกันไฟฟ้า	สารพวกไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น สารตัวเติมพวกแร่ธาตุ น้ำมัน ไฮโดรคาร์บอน	5-50
กันไฟฟ้าสถิตย์	สารกันไฟฟ้าสถิตย์ เช่น พวกเอสเทอร์ที่มีขั้ว เขม่าดำ	0.1-2.0, 1-5
ตัวนำไฟฟ้า	สารตัวนำไฟฟ้า เช่น เขม่าดำ อนุภาคโลหะและเกลือโลหะ	10-50

## 2.4 การผสมยางกับสารเคมี (Rubber and Chemical Mixing)

ในการผสมยางนั้น เครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ในการผสมยางก็คือ เครื่องผสมยาง ซึ่งเครื่องผสมยางที่ใช้กันทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามรูปแบบการทำงาน ดังนี้

### 2.4.1 เครื่องผสมยางระบบเปิด

เครื่องผสมยาง 2 ลูกกิ้ง (Two Roll Mill) เป็นเครื่องที่นิยมใช้กันมาตั้งแต่อดีต ซึ่งมีลักษณะเป็นลูกกิ้ง 2 ลูกกิ้ง ซึ่งการทำงานลูกกิ้ง 2 ลูกจะหมุนเข้าหากัน แต่อัตราเร็วของการหมุนของลูกกิ้งแต่ละลูกจะแตกต่างกัน แล้วแต่ว่าจะออกแบบอย่างไร ส่วนใหญ่แล้ว ลูกกิ้งลูกที่หมุนช้าจะอยู่ด้านหน้าผู้ใช้ และลูกกิ้งตัวหลังจะหมุนเร็ว แต่บางครั้งเพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่าย ก็มีการออกแบบให้ลูกกิ้งตัวหน้าหมุนเร็วกว่าเพราะยางบางชนิดโดยเฉพาะยางสังเคราะห์จะชอบพันลูกกิ้งที่มีความเร็วสูง ดังนั้นหากออกแบบให้ลูกกิ้งตัวหน้าหมุนเร็วก็จะทำให้สามารถผสมได้ง่ายขึ้น

ข้อเสียของเครื่องผสมยาง 2 ลูกกิ้ง

- ใช้ระยะเวลาในการผสมค่อนข้างนาน
- ประสิทธิภาพการผสมขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ปฏิบัติการ



- มีฝุ่นละอองและความสกปรกสูง

- ควบคุมความสม่ำเสมอของคุณภาพยางในแต่ละครั้งได้ยาก

ปัจจุบันจึงมีความนิยมใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งสำหรับบดผสมสารเคมีพวกที่ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์โดยผสมกับยางมาสเตอร์แบทมากกว่าจะผสมโดยใช้วัตถุดิบต่างๆ มาผสมทีเดียว



ภาพที่ 2.3

เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)

#### 2.4.2 เครื่องผสมยางระบบปิด

เป็นเครื่องผสมยางขนาดใหญ่ มีความสามารถบดยางและผสมยางกับสารเคมีได้ในปริมาณมากกว่าเครื่องผสมยางระบบเปิด สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว เครื่องบดผสมแบบปิด การบดผสมจะเกิดในห้องผสม โดยมีกระบอก (Ram) ที่มีน้ำหนักกดลงมาภายในห้องผสมมีโรเตอร์ 2 ชุดขนานกัน ที่ผิวของโรเตอร์มีลักษณะเป็นใบมีด ดันยางและสารเคมีเข้าผสมกันเครื่องผสมระบบปิดมีความเหมาะสมและ มีความจำเป็นอย่างยิ่งกับการบดผสมในปริมาณมากและโดยเฉพาะกับการบดผสมที่มีส่วนผสมของสารพวกเคมีดำ เพราะจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของเคมีดำ

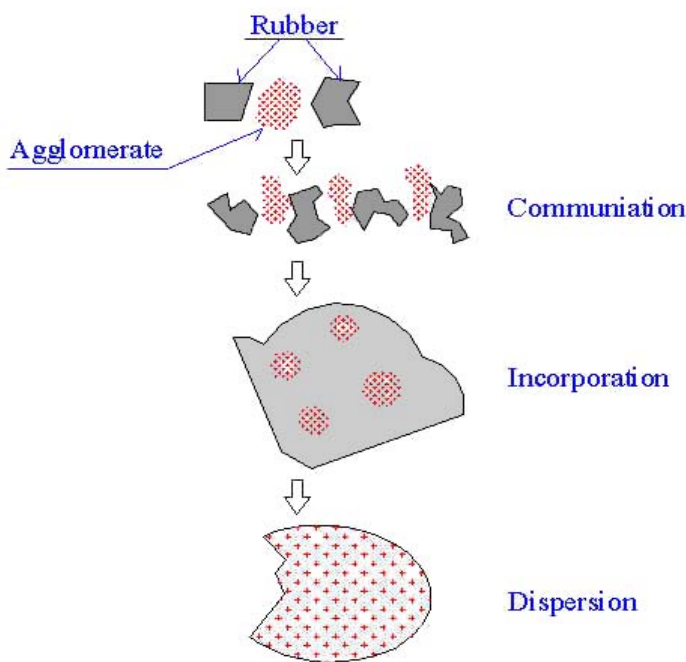


ภาพที่ 2.4

เครื่องผสมยางระบบปิด (Internal Mixer)

การบดย่อยยาง (Mastication) สำหรับการบดย่อยยางนี้มีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า มาสตีเคชัน (Mastication) การบดย่อยยางเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการผสมยางโดยเฉพาะยางที่มีความหนืดสูงๆ เช่น ยางธรรมชาติ เพราะเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง การบดย่อยยางทำให้ความหนืดของยางต่ำลง หรือ ทำให้ยางนิ่มลงและสามารถผสมสารเคมีเข้าไปได้ง่ายและ การกระจายตัวของสารต่างๆ ที่ใส่ลงไปก็ง่ายและเป็นเนื้อเดียวกันด้วย แต่สำหรับยางสังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำการย่อยยางไม่ค่อยมีผล และการเลือกใช้อ่างสังเคราะห์ก็สามารถเลือกใช้อ่างที่มีความหนืดหรือน้ำหนักโมเลกุลที่ต้องการได้ในระหว่างการบดย่อยยาง โมเลกุลของยางจะถูกตัดให้ขาดด้วยแรงเชิงกล (แรงเฉือน) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยยางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รวมไปถึงชนิดและปริมาณของสารเปปไทเซอร์ (Peptizer) ที่อุณหภูมิต่ำ ความหนืดของยางจะค่อนข้างสูง ดังนั้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้การตัดขาดของโมเลกุลยางส่วนใหญ่เกิดจากแรงเชิงกล (ผลของแรงเฉือน) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของยางก็จะลดลง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นก็จะลดลงไปด้วย ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยยางอันเนื่องมาจากแรงเชิงกลก็จะลดลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการเติมสารเปปไทเซอร์ลงไป ประสิทธิภาพของการย่อยยางก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิเพราะสารเปปไทเซอร์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ความหนืดของยางที่ลดลงจากแรงเชิงกลและสารเปปไทเซอร์จะ

เกิดขึ้นอย่างถาวรแต่การลดลงเนื่องจากความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจเกิดแบบถาวรหรือชั่วคราวนั้นก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของยางด้วย การบดผสมสารเคมีเข้าไปในยาง เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการแปรรูปยาง ทำให้ยางดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมี เริ่มต้นด้วยการบดยางให้หั่นลง แล้วเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป โดยสารเคมีเหล่านี้จะช่วยให้อายุางแปรรูปได้ง่ายหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติตามต้องการ โดยยางที่ผสมสารเคมีเราเรียกว่ายางผสมสารเคมี (Rubber Compound) และยางที่ผสมสารเคมีเพียงหนึ่งชนิดหรือสองชนิดเรียกว่า Master Batch เช่น 50% กำมะถัน Master batch หมายถึง ยางดิบผสมกำมะถัน 50 ส่วนใน Compound 100 ส่วน ขั้นตอนการผสมสารเคมีเข้าไปในยางมี 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ การย่อยให้อายุางเป็นชิ้นเล็กๆ (Communiation), การอัดสารเคมีให้เข้าไปในยาง (Incorporation), การทำให้อายุางเป็นชิ้นเล็กๆ (Dispersion)



ภาพที่ 2.5

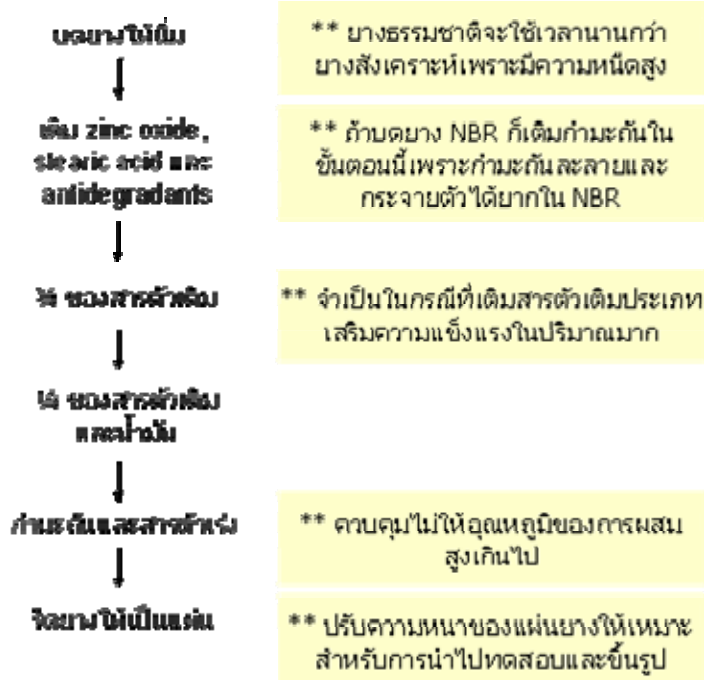
การผสมสารเคมีเข้าไปในยาง (พงษ์ธร, 2548)

ขั้นตอนที่ 1 เป็นกระบวนการก่อนการผสมสารเคมี จะย่อยยางแท่งให้ฉีกขาดและอ่อนตัวลง เป็นการย่อยให้ขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยอาศัยพลังงานกลจากเครื่อง Two Roll Mill จนกระทั่งยางอ่อนตัวอยู่ในสถานะความเป็นพลาสติกที่มีความเหนียวและเลื่อนไหลได้

ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่ใส่สารเคมี จะเกิดการผสมระหว่างยางกับสารเคมี (Incorporation) โดยผงสารเคมีจะถูกอัดติดกับยางจนกระทั่งสารเคมีเข้าไปในยางจนหมด และขนาดของ Batch size จะลดลงเพราะอากาศในสารเคมีถูกไล่ออกไป ทำให้ยางผสมสารเคมีมีความหนาแน่นสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการผสมได้อีกด้วย

ขั้นตอนที่ 3 เป็นกระบวนการที่สารเคมีแพร่กระจายในเนื้อยาง ในขณะที่เดียวกันสารเคมีที่มีการรวมตัวกันอย่างหลวมๆ Agglomerate จะแตกออกจากกันจนกระทั่งขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.1 ไมครอน การกระจายตัวของสารเคมีในยางจะเกิดขึ้นมากในบริเวณที่เกิดความเครียดเฉือนสูงๆ

ขั้นตอนการบดผสม (Mixing Step) ในการบดผสมยางอย่างมีประสิทธิภาพและบดยางให้มีความสม่ำเสมอในคุณภาพนั้น ลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆ ต้องเป็นไปตามขั้นตอนอย่างถูกต้อง หลักการโดยทั่วไปคือ หลังจากการบดยางให้ نرم ก็เติมสารที่บดให้กระจายในเนื้อยางได้ยากก่อน เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic Acid) ผงเขม่าดำ เพราะช่วงนี้คุณสมบัติในการบดยังต่ำ และยางมีความเหนียวสูง แรงกระทำเชิงกลจึงมีมาก จากนั้นจึงเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง สารอื่นๆ และน้ำมัน สารที่แนะนำให้เติมลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่ง กำมะถัน และสารป้องกันยางตาย (Scorch) ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) ภาพที่ 14 แสดงลำดับของการบดผสมโดยทั่วไป



ภาพที่ 2.6

ขั้นตอนการผสมยางและสารเคมี (พงษ์ธร, 2548)

## 2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง (Physicals testing of rubber)

### 2.5.1 การหาความถ่วงจำเพาะ

การวัดความหนาแน่น (Density) และความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) จัดเป็นวิธีการที่ง่ายในการตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของยาง ยางผสมสารเคมีหรือสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกและไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน การทราบค่าความหนาแน่นของยางผสมสารเคมีจากข้อมูลเดิมหรือจากการคำนวณทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการผสมสารเคมีในครั้งนั้นหรือทราบถึงความผิดปกติ เช่น หากมีการชั่งสารเคมีผิดพลาดมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจากที่กำหนด ค่าความหนาแน่นที่ได้จะต่างไปจากเดิมทำให้เรารู้ว่ามีความผิดพลาดในการชั่งสารเคมี ความหนาแน่นเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ดังนั้น ความหนาแน่นจึงเป็นค่ามีบอกปริมาณของเนื้อสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตร สารเนื้อเดียวกันจะมีความหนาแน่นที่สามารถบ่งชี้ชนิดของวัตถุได้ ความหนาแน่นของสารเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ หน่วยที่นิยมใช้คือ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

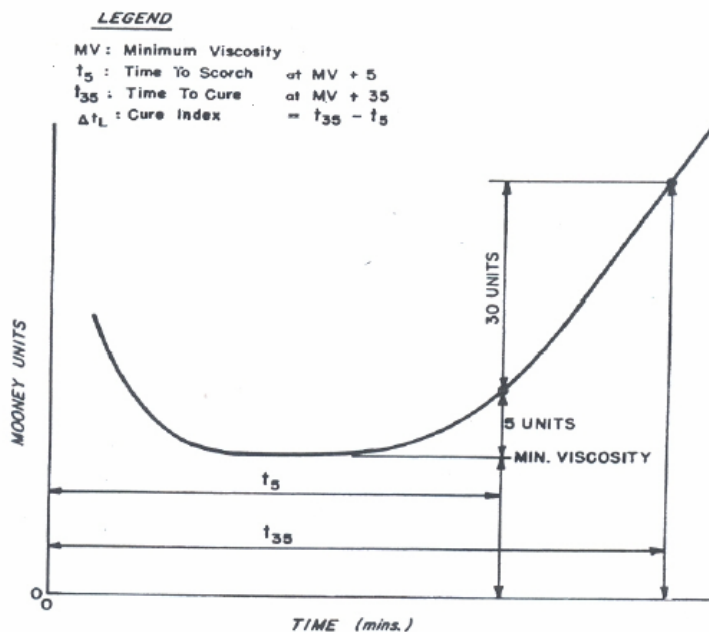
ความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ เป็นตัวเลขที่แสดงขนาดของมวลสารที่วัดเปรียบเทียบกับมวลสารอ้างอิง (ส่วนใหญ่ใช้น้ำ) เมื่อมีปริมาตรเท่ากับสารอ้างอิงนั้น ค่าที่วัดนี้จะระบุคุณสมบัติที่วัดด้วยเสมอ คำว่า ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ. หรือ s.g.) เป็นคำเดิมในระบบสากลใช้ คำว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ แทนเพื่อสอดคล้องกับความหมายที่แท้จริงนั่นคือ ความหนาแน่นของสารเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของน้ำ ดังนั้น ถ.พ. จึงเป็นตัวเลขที่บอกว่า วัตถุที่มีความหนาแน่นเป็นกี่เท่าของน้ำหรือเป็นตัวเลขที่บอกว่าสารนั้นหนักเป็นกี่เท่าของน้ำเมื่อมีปริมาตรเท่ากัน ในทางปฏิบัติค่าความหนาแน่นกับค่า ถ.พ. มักใช้ปนกัน สำหรับข้อแตกต่างคือ ค่า ถ.พ. จะไม่มีหน่วยแต่ความหนาแน่นจะมีหน่วย สำหรับเครื่องมือที่นิยมใช้วัดค่าความถ่วงจำเพาะ คือ เครื่อง Density Gravimeter เป็นเครื่องซึ่งสำเร็จที่ออกแบบมาสำหรับหาค่าความถ่วงจำเพาะของยาง

### 2.5.2 การทดสอบลักษณะการคงรูป (Cure Characteristic)

หลังจากที่ผสมยางคอมพอนด์แล้ว ก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตถัดไป จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำยาง (ชิ้นตัวอย่าง) แต่ละแบท (Batch) มาทำการทดสอบลักษณะการคงรูป และผลที่ได้สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการผสมหรือไม่ เช่น หากมีการชั่งสารเคมีผิดชนิดลักษณะของผลที่ได้จะผิดไปจากเดิม ปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการคงรูปของยางมี 3 ชนิด ได้แก่

#### 1. เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney Viscometer)

แม้ว่าเครื่องมือนี้จะถูกออกแบบมาเพื่อการทดสอบความหนืดของยาง แต่ก็สามารถนำมาใช้ทดสอบลักษณะการคงรูปได้เพราะว่า ความหนืดของยางแปรผันโดยตรงกับระดับการคงรูปของยาง ดังนั้นจึงสามารถนำมาทดสอบการคงรูปของยางได้ (ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1646) สำหรับการทดสอบทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบหาความหนืดแต่จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่า



ภาพที่ 2.7

ลักษณะการคงรูปของยางที่ได้จากเครื่อง Mooney Viscometer (กรณีที่ใช้โรเตอรีใหญ่)

ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะการคงรูปของยางที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อยางเริ่มเกิดการคงรูป ความหนืดของยางก็จะสูงขึ้น การรายงานการทดสอบส่วนใหญ่จะรายงานค่าต่างๆ ดังนี้

- ความหนืดต่ำสุด
- ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีค่าความหนืดสูงกว่าจุดต่ำสุด 5 หน่วย (สำหรับโรเตอรีขนาดใหญ่) และ 3 หน่วย (สำหรับโรเตอรีขนาดเล็ก) และใช้สัญลักษณ์ว่า  $t_5$  และ  $t_3$  ตามลำดับ บางครั้งจะเรียกระยะเวลานี้ว่า “ระยะเวลามูนนี่สกอร์ช (Mooney Scorch Time)”

- ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีค่าความหนืดสูงกว่าจุดต่ำสุด 35 หน่วย (สำหรับโรเตอรีขนาดใหญ่) และ 18 หน่วย (สำหรับโรเตอรีขนาดเล็ก) และใช้สัญลักษณ์ว่า  $t_{35}$  และ  $t_{18}$  ตามลำดับ

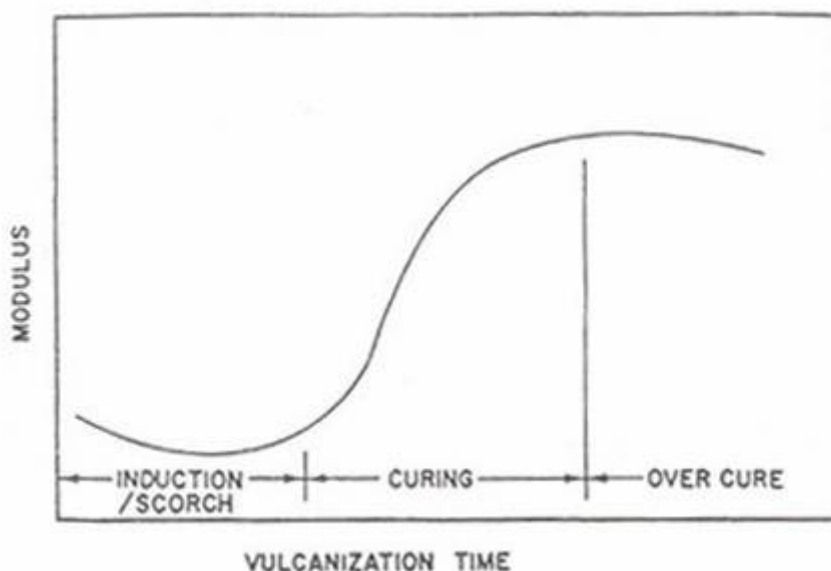
- ดัชนีการคงรูป (Cure Index) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

สำหรับโรเตอรีใหญ่ :  $DTL = t_{35} - t_5$

สำหรับโรเตอรีเล็ก :  $DTS = t_{18} - t_3$

2. เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disc Rheometer) หรือเรียกย่อว่าเครื่อง ODR เครื่อง ODR เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะของการคงรูปยางโดยตรงตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่ในช่องระหว่างดาดบนและดาดล่างเช่นเดียวกับเครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์ โรเตอร์ของเครื่อง ODR มีรูปร่างเป็นรูปโคนคู่ประกบ (Biconical Shape) และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่ง โดยการแกว่งของโรเตอร์จะเกิดเป็นมุมแคบๆ

หลังจากที่ได้ให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้แล้ว นำชิ้นตัวอย่างขึ้นยางคอมปานด์ มาวางไว้บนโรเตอร์และกดปุ่มเริ่มทดสอบ ดาดบนก็จะเลื่อนลงมาประกบดาดล่าง ความดันที่เกิดขึ้นจะอัดให้ยางไหลเต็มห้องทดสอบ จากนั้นดาดก็จะแกว่งไปมา  $1^\circ$  ด้วยความถี่ 100 รอบต่อนาที ซึ่งผลที่ได้ก็จะได้เป็นกราฟการคงรูป (Cure Curve)



ภาพที่ 2.8

ลักษณะกราฟการคงรูปของยางคอมปานด์ที่ได้จากเครื่องทดสอบรีโอมิเตอร์



จากรูป จะเห็นได้ว่าลักษณะการคงรูปของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ คือ

1. ช่วงเริ่มต้น (Induction) เมื่อตัวอย่างยางได้รับความร้อน ยางก็จะอ่อนตัวลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรกๆ ของการทดสอบ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่ ณ จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการคงรูป ค่าความหนืดต่ำสุดนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป ใช้สัญลักษณ์  $M_L$

2. ช่วงการคงรูป (Curing) หลังจากที่ยางมีค่าความหนืดต่ำสุด ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเริ่มเกิดการคงรูป (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มคงรูปเรียกว่า ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch Time) และใช้สัญลักษณ์ เป็น  $t_{s2}$

- เนื่องจากระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ ดังนั้น ระยะเวลาสกอร์ชจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต

- เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไป ค่าแรงบิดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับการคงรูป จนกระทั่งถึงจุดที่การคงรูป (Crosslink) เกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า MH ซึ่งค่าแรงบิด ณ จุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า MH ซึ่งค่าแรงบิดสูงสุดนี้จะเป็นค่าที่จะบ่งชี้ถึงความแข็งแรงหรือค่าโมดูลัสเฉือนของยางคงรูป ณ อุณหภูมิของการทดสอบ

- ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่บ่งชี้ลักษณะของการคงรูป คือ ระยะเวลาของการคงรูป (Curing Time) ส่วนใหญ่นิยมใช้  $t_{c90}$  ซึ่งหมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 ซึ่งเวลา  $t_{c90}$  นี้เป็นเวลาคงภาพที่เหมาะสม (Optimize Curing Time)

3. ช่วงของการคงสภาพที่มากเกินไป (Overcure) เมื่อปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์แล้วแต่ยังดำเนินการทดสอบต่อไป หากแรงบิดยังคงที่เรียกว่าเกิด Plateau แต่หากแรงบิดยังเพิ่มขึ้นอีก ก็จะเรียกว่าเกิดการ Marching และหากแรงบิดลดลงหรือเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนจะเรียกว่าเกิด Reversion

4. เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer) หรือเรียกว่า MDR เป็นเครื่องทดสอบลักษณะการคงรูปของยางโดยไม่มีโรเตอร์ หลักการทำงานเหมือนกับเครื่อง ODR เพียงแค่ไม่มีโรเตอร์เท่านั้น เมื่อเริ่มทดสอบ ตายล่างจะแกว่งไป-มา เป็นมุมแคบๆ ส่วนใหญ่ใช้ 1 องศา จากนั้นเครื่องก็จะเริ่มบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ผลที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับผลของเครื่อง ODR ข้อดีของเครื่อง MDR ที่ดีกว่า ODR คือ มีแรงเสียดทานต่ำกว่า การถ่ายเทความ

ร้อนจากโลหะสู่ยางสามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเพราะขึ้นทดสอบมีขนาดเล็กกว่าและสามารถเอาชิ้นงานทดสอบที่ทดสอบเสร็จแล้วออกจากเครื่องทดสอบได้ง่ายกว่าด้วย สำหรับมาตรฐานของการทดสอบโดยใช้เครื่อง MDR คือ ASTM D 5289

### 2.5.3 การทดสอบวัดความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้น หลักการพื้นฐานของการวัดค่าความแข็งก็คือ จะนำหัวกดไปกดลงบนชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกด จะสะท้อนถึงค่าความแข็งของยางเพราะยางที่มีความแข็งสูงก็จะมีความลึกของการทะลุทะลวงต่ำ

เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมี 2 แบบ คือ เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) เช่น แบบ shore A และอีกแบบคือเครื่องวัดความแข็งในหน่วยของ IRHD (International Rubber Hardness Degree) เนื่องจากเครื่องดูโรมิเตอร์จะใช้แรงกดจากสปริงจึงมีความแม่นยำต่ำกว่าเครื่องวัดความแข็งแบบ IRHD ซึ่งใช้น้ำหนักที่คงที่เป็นตัวกดอย่างไรก็ตามเครื่องดูโรมิเตอร์ก็ยังเป็นเครื่องนิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเครื่องมีราคาค่อนข้างต่ำ สำหรับการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ได้กำหนดไว้ว่าชิ้นทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร และชิ้นทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้าง ที่สูงเพียงพอที่ทำให้ผู้ทดสอบสามารถวัดความแข็งของยางในบริเวณที่ห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร การกดหัวกดต้องกระทำด้วยความรวดเร็วและต้องออกแรงกดให้มากพอที่จะทำให้หัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบแล้วจึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที โดยทั่วไปผู้ทดสอบควรทำการวัดความแข็งอย่างน้อย 5 จุด บนชิ้นทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้ และผลการทดสอบอาจมีความแปรปรวนได้เนื่องจากค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วของการกดหัวลงบนชิ้นทดสอบ ระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็ง และแรงที่ใช้กดหัวกด เป็นต้น การเพิ่มความเร็วของการกดหัวกดจะทำให้ความแข็งของยางที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น ส่วนระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็งก็มีผลอย่างมากต่อค่าที่วัดได้เช่นกันเพราะโดยทั่วไปแล้ว การอ่านค่าทันทีหลังจากที่ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบก็อาจทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าการอ่านค่าหลังจากนั้น 2-3 วินาที การลดลงของค่าความแข็งตามเวลาจะเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้าเพียงใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับสมบัติวิสโคอิลาสติกของยาง สำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นสูง ค่าความแข็งที่วัดได้ก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามเวลาที่อ่าน แต่สำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นต่ำก็จะพบว่าค่า

ความแข็งที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามเวลาที่อ่านค่า ส่วนปัจจัยสุดท้ายที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งที่อ่านได้คือ แรงที่ใช้ในการกดหัวกด ในเชิงทฤษฎี มาตรฐานระบุว่าแรงที่ใช้ในการกดควรมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้ฐานหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติแต่ละคนก็ออกแรงกดที่แตกต่างกันไปทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้ เพราะแรงกดที่สูงอาจทำให้ค่าที่อ่านสูงไปด้วย ดังนั้น มาตรฐาน ASTM จึงได้เสนอแนะให้นำน้ำหนักมาตรฐานไปวางไว้ที่ตรงกลางของแกนหัวกดเพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดสอบที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งน้ำหนักมาตรฐานที่แนะนำคือ 1 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วย Shore A เป็นต้น

สำหรับหน่วย IRHD มาตรฐาน ASTM D 1415 ได้กำหนดไว้ว่าชิ้นทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้างไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 4 มิลลิเมตร สำหรับในการวัดความแข็งในหน่วย IRHD จะทำการวัด 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่ากลาง

#### 2.5.4 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Testing of Tensile Property)

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงนิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยาง สำหรับการทดสอบจะประกอบไปด้วย ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) และ โมดูลัส (Modulus) มาตรฐานที่ใช้ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ได้แก่ ASTM D 412 เป็นต้น สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสามารถวัดได้ โดยการดึงชิ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ เครื่องที่ใช้ในการทดสอบเรียกว่าเครื่อง Tensile Testing Machine สำหรับรูปแบบของชิ้นทดสอบที่นิยมใช้ได้แก่ ชิ้นทดสอบรูปดัมเบล การเตรียมชิ้นทดสอบแบบดัมเบลนั้นทำได้หลายวิธี เช่น ฉีดยางเข้าแม่พิมพ์ด้วยเครื่อง Injection Molding หรือขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แล้วนำมาตัดด้วย Die แต่ต้องกด Die เพียงครั้งเดียวให้ยางขาดและทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าความเป็นจริง เมื่อได้ชิ้นทดสอบดัมเบลแล้วก็นำเอามาวัดความหนา 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM D 412 คือ บริเวณทั้ง 2 ด้านของคอดัมเบลล์ และตรงกลาง จากนั้นก็นำค่ากลางไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด เมื่อได้ชิ้นทดสอบก็นำไปทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงอ่านค่าแรงที่ใช้ดึงจนขาดมาคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Susmita Bhattacharjee, Anil K. Bhowmick and B.N. Avasthi (2003) ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของยาง HNBR อันเนื่องมาจากความร้อน โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิระหว่าง  $75^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศปกติ และที่อุณหภูมิห้องถึง  $800^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจน พบว่ายาง HNBR ซึ่งมีส่วนประกอบของความอิมตัวของโครงสร้างโมเลกุล (HSN) มาก เวลาในการทนทานต่อความร้อนจะมากขึ้น ในขณะที่ยาง NBR จะมีเวลาในการทนทานต่อความร้อนน้อยกว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

A. Mostafa, A. Abouel-Kasem, M.R. Bayoumi, M.G. El-Sebaie (2008) ได้ทำการศึกษาค่าของการบวมพอง (Swelling) และการผิดรูปจากการกด (Compression set) โดยการใช้เข็มดำในยางคอมเปาว์ด SBR และ NBR แปรปริมาณเข็มดำ 0, 20, 30, 50 และ 70 phr พบว่าการเพิ่มปริมาณเข็มดำ เปอร์เซ็นต์ของการบวมพอง (Swelling) จะลดลงในขณะที่ค่าการผิดรูปจากการกด (Compression Set) จะเพิ่มขึ้นทั้งยางคอมเปาว์ด SBR และ NBR ที่ปริมาณการใช้เข็มดำปริมาณที่เท่ากัน ยางคอมเปาว์ด NBR จะมีเปอร์เซ็นต์ของการบวมพอง (Swelling) น้อยกว่ายางคอมเปาว์ด SBR ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้างโมเลกุลของยาง NBR มากกว่า SBR เมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของการบวมพอง (Swelling) จะเพิ่มขึ้นเช่นกันอันเนื่องมาจากน้ำมันเข้าไปแทรกซึมในสายโซ่โมเลกุลยาง ที่ปริมาณการใช้เข็มดำเท่ากัน ยางคอมเปาว์ด NBR ค่าการผิดรูปจากการกด (Compression Set) จะสูงกว่ายางคอมเปาว์ด SBR เล็กน้อย จากผลการวิจัยที่มานพบว่ายางที่เหมาะสมจะทำ Seal ในมอเตอร์ควรจะเป็นยาง NBR ที่ใช้เข็มดำ 50 phr

Sung-Seen Choi and Sung-Ho Ha (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและปริมาณของ Acrylonitrile Content (ACN) ที่ส่งผลต่อการบวมพองในน้ำของยาง NBR ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}\text{C}$  โดยพบว่าที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}\text{C}$  จะมีการบวมพองมากกว่าที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น และอัตราการบวมพองจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและปริมาณของ Acrylonitrile Content (ACN) เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ชัชวาลย์ กันทะลา, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ ชาคกริต สิริสิงห (2007) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารช่วยประสานต่อ สมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง NBR โดยใช้สารช่วยประสานยางคลอโร

พรีนและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0 ถึง 7 phr ในงานวิจัยนี้ใช้ยาง NR กับยาง NBR ที่สัดส่วน 20:80 ผลการทดลองพบว่า การเติมสารช่วยประสาน ยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ทำให้ค่าความเหนียวของยางผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสารช่วยประสานยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ อย่างไรก็ตาม พบว่า การเติมสารช่วยประสานไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวเวลาในการคงรูป และค่าความแตกต่างแรงบิด แต่ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้นโดยการเติมสารช่วยประสาน 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสม

ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และคณะ (2005) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของพอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติและยางอีพดีเอ็ม (สัดส่วน 70:30) และสมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ปริมาณและชนิดสารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ พบว่า ยางคอมปาวด์เติมด้วยเคลย์มีการหดตัวน้อยที่สุด และยางคอมปาวด์เติมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมีการหดตัวมากที่สุด ขณะที่ยางคอมปาวด์เติมด้วยคาร์บอนแบล็กและซิลิกามีการหดตัวคล้ายคลึงกัน สำหรับยางวัลคาไนซ์ทั้งหมดพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในคอมปาวด์ ทำให้การหดตัวของยางวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากสัดส่วนยางลดลง การเปลี่ยนแปลงการหดตัวนี้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนของแต่ละคอมปาวด์ นอกจากนี้ยังพบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ประสิทธิภาพมีการหดตัวน้อยกว่ายางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์กึ่งประสิทธิภาพ ภาพและระบบวัลคาไนซ์ปกติตามลำดับ เนื่องมาจากระบบวัลคาไนซ์ประสิทธิภาพทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางสูงที่สุด ยางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงเหนียวมากทำให้มีการหดตัวต่ำ

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1  
วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

Raw material	Type	Comercial name	Supplier
HNBR	Rubber	ZETPOL 1020	Nippon Zeon Co., Ltd.
NBR/PVC (70:30)	Rubber	1203D	Nantex Co., Ltd.
NBR	Rubber	N230S	JSR Co., Ltd.
Carbon Black	Filler	N-774	Thai Carbon Product Co., Ltd.
ZnO	Activator	White Seal	Univentures Public Co., Ltd.
Stearic Acid	Activator	Stearic acid	Palm-Oleo SDN. BHD.
TMTM	Accelerator	TMTM	Flexsys Co., Ltd.
CBS	Accelerator	CBS	Flexsys Co., Ltd.
Sulphur	Vulcanizing Agent	CURAGENT OS	Chemmin Corporation Ltd.

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

3.2.1 เครื่องผสมยางแบบปิดชนิด Kneader ขนาด 3 ลิตร ใช้ในการบดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เข้าด้วยกัน ผลิตโดยบริษัท HAP DONG MACHINERY ประเทศเกาหลี



ภาพที่ 3.1

เครื่องผสมยางแบบปิดชนิด Kneader

3.2.2 เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้งใช้ในการผสมยางกับสารเคมี เพื่อให้สารเคมีกระจายในยางได้ดียิ่งขึ้น ลูกกลิ้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 นิ้ว ผลิตโดยบริษัท YI TZUNG ประเทศไต้หวัน



ภาพที่ 3.2

เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง

3.2.3 เครื่องอัดเบา ใช้สำหรับขึ้นรูปร่างด้วยแม่พิมพ์ เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบขนาดต่างๆ สำหรับการทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัท HONG YOW THAI ประเทศไทย



ภาพที่ 3.3  
เครื่องอัดเบา

3.2.4 เครื่องรีโอมิเตอร์ ใช้สำหรับหาลักษณะของการวัลคาไนซ์ของยาง เป็นเครื่องรีโอมิเตอร์รุ่น MDR 2000 ผลิตโดยบริษัท ALPHA TECHNOLOGY ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 3.4  
เครื่องรีโอมิเตอร์



3.2.5 เครื่องมุนีวีลโคมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดความหนืดของยาง เครื่องมุนีวีลโคมิเตอร์ รุ่น MV 2000 ผลิตโดยบริษัท ALPHA TECHNOLOGY ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 3.5  
เครื่องมุนีวีลโคมิเตอร์

3.2.6 เครื่องวัดการกระจายตัวของเขม่าดำ ใช้สำหรับวัดการกระจายตัวของเขม่าดำ และขนาดของเขม่าดำที่จับตัวเป็นก้อน รุ่น Disper Grader 1000 กำลังขยาย 100 เท่า ผลิตโดยบริษัท OPTIGRADE AB ประเทศสวีเดน



ภาพที่ 3.6  
เครื่องวัดการกระจายตัวของเขม่าดำ

3.2.7 เครื่องวัดความแข็ง ใช้ในการทดสอบความแข็งของยางเป็นแบบ JIS A  
ผลิตโดยบริษัท TECLOCK ประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ 3.7  
เครื่องวัดความแข็ง

3.2.8 เครื่องทดสอบแรงดึง ใช้ในการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการยืดขาด และความทนทานต่อการฉีกขาด ผลิตโดยบริษัท Lloyd Instrument ประเทศอังกฤษ



ภาพที่ 3.8  
เครื่องทดสอบแรงดึง

3.2.9 เครื่องทดสอบความทนทานต่อโอโซน ใช้สำหรับผลิตโอโซนเพื่อทดสอบความทนทานต่อโอโซนของยาง ผลิตโดยบริษัท SUGA TEST INSTRUMENT ประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ 3.9

เครื่องทดสอบความทนทานต่อโอโซน

3.2.10 ตู้ Oven เป็นตู้ที่ให้อากาศร้อน ใช้สำหรับทดสอบความทนทานต่อความร้อนของยาง ผลิตโดยบริษัท MEMMERT ประเทศเยอรมัน



ภาพที่ 3.10

ตู้ Oven

### 3.2.11 ชุดทดสอบการผิดรูปที่เกิดจากการกด ใช้วัดการผิดรูปจากการกดยาง



ภาพที่ 3.11

ชุดทดสอบการผิดรูปที่เกิดจากการกด

## 3.3 วิธีการทดลองและทดสอบ

### 3.3.1 ศึกษาการกระจายตัวของเขม่าดำในยางผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR/PVC และ NBR

#### 3.3.1.1 สูตรยางที่ใช้ในการทดลอง

ผสมยางคอมปาว์ระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC และ NBR ด้วยเครื่องผสมยาง แบบปิดชนิด Kneader ขนาด 3 ลิตร โดยใช้ Fill Factor = 0.80 ตามสูตรต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2

สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV

No.	Material	Type	HNV-0 (EV)	HNV-10 (EV)	HNV-20 (EV)	HNV-30 (EV)	HNV-40 (EV)	HNV-50 (EV)
1	ZETPOL1020	HNBR	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00
2	1203D	NBR/PVC	-	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
3	N-774	Filler	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00
4	L-40	Activator	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	Stearic Acid	Activator	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	TMTM	Accelerator	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
7	CBS	Accelerator	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
8	OS	Curing Agent	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

ตารางที่ 3.3

สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ระบบการวัลคาไนซ์แบบ Conventional

No.	Material	Type	HNV-0 (EV)	HNV-10 (CV)	HNV-20 (CV)	HNV-30 (CV)	HNV-40 (CV)	HNV-50 (CV)
1	ZETPOL1020	HNBR	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00
2	1203D	NBR/PVC	-	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
3	N-774	Filler	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00
4	L-40	Activator	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	Stearic Acid	Activator	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	TMTM	Accelerator	0.60	-	-	-	-	-
7	CBS	Accelerator	3.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
8	OS	Curing Agent	0.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50

## ตารางที่ 3.4

สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV

No.	Material	Type	HN-0 (EV)	HN-10 (EV)	HN-20 (EV)	HN-30 (EV)	HN-40 (EV)	HN-50 (EV)
1	ZETPOL1020	HNBR	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00
2	N230S	NBR	-	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
3	N-774	Filler	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00
4	L-40	Activator	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	Stearic Acid	Activator	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	TMTM	Accelerator	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
7	CBS	Accelerator	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
8	OS	Curing Agent	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

## ตารางที่ 3.5

สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR ระบบการวัลคาไนซ์แบบ Conventional

No.	Material	Type	HN-0 (EV)	HN-10 (CV)	HN-20 (CV)	HN-30 (CV)	HN-40 (CV)	HN-50 (CV)
1	ZETPOL1020	HNBR	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00
2	N230S	NBR	-	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
3	N-774	Filler	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00
4	L-40	Activator	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	Stearic Acid	Activator	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	TMTM	Accelerator	0.60	-	-	-	-	-
7	CBS	Accelerator	3.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
8	OS	Curing Agent	0.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50

หน่วย phr (Part Per Hundred Rubber)

### 3.3.1.2 ขั้นตอนของการผสมยาง

ขั้นตอนที่ 1 ใส่ยาง HNBR (No.1) และ ยาง NBR/PVC (No.2) หรือ ยาง NBR ลงในเครื่องผสม Kneader บดผสมเป็นเวลา 2 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ใส่สารตัวเติมเขม่าดำ (No.3) และสารเคมีอื่นๆ (No.4-5) ลงในเครื่องผสม Kneader บดผสมเป็นเวลา 4 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ทำความสะอาดเครื่องผสม Kneader แล้วบดผสมต่ออีกเป็นเวลา 2 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ใส่สารตัวเร่ง (No.6-7) และสารวัลคาไนซ์ยาง (No.8) ลงในเครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้งบดผสมเป็นเวลา 2 นาที

### 3.3.1.3 การหาการกระจายตัวของเขม่าดำด้วยเครื่อง Disper Grader 1000

เตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบยางวัลคาไนซ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 4.5 mm ยาว 4 mm จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละสูตรยาง วางขึ้นทดสอบในที่ยึดขึ้นทดสอบ โดยหันด้านที่ตัดใหม่ ๆ เข้าหาช่องสแกนแล้วทำการสแกนขึ้นทดสอบ จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งของขึ้นทดสอบ แล้วทำการ สแกนซ้ำ โดยค่าที่สแกนได้จะบอกเป็นค่า X ตั้งแต่ 1 ถึง 10 ซึ่งหมายถึง ระดับของการกระจายตัวของเขม่าดำ ถ้าค่า X มีค่ามาก หมายถึง มีการกระจายตัวของเขม่าดำที่ดี และค่า Y ตั้งแต่ 1 ถึง 10 ซึ่งหมายถึงขนาดของเขม่าดำที่จับตัวเป็นก้อน ถ้าค่า Y มีค่ามาก หมายถึงขนาดของเขม่าดำที่จับตัวเป็นก้อนมีขนาดเล็ก เมื่อทำการสแกนขึ้นทดสอบครบทั้ง 5 ชิ้นแล้วเครื่องจะหาค่าเฉลี่ยของ ค่า X และ Y

### 3.3.2 ศึกษาสมบัติด้านการไหลและความหนืดของยางผสม

ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวิสโคมิเตอร์โดยใช้อุณหภูมิ 125 °C และใช้โรเตอร์ขนาดเล็กในการทดสอบ ให้ความร้อนแก่ยางเป็นเวลา 1 นาที (Pre-Heat) แล้วเดินเครื่องทดสอบและอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากโรเตอร์หมุนไปได้ 4 นาที รายงานผลค่าความหนืดมูนนี้ โดยมีหน่วยเป็น Mooney Unit (MU)

### 3.3.3 ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม

ทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์โดยใช้อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 7 นาที โดยเครื่องทดสอบจะรายงานผลเป็นค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ระยะเวลาที่ทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 10 (T10) และระยะเวลาที่ทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 (T90)

### 3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสม

นำยางคอมเพาว์ดที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เพื่อเตรียมขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮดรอลิคโดยใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 12 นาทีสำหรับขึ้นทดสอบความแข็ง ใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 10 นาทีสำหรับขึ้นทดสอบวัดความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation at break) และ ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) และ ใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 25 นาทีสำหรับขึ้นทดสอบวัดความทนทานต่อการผิกรูป หลังจากนั้นนำขึ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้

#### 3.3.4.1 การวัดค่าความแข็ง (Hardness)

เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ Shore A โดยใช้ขึ้นทดสอบที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 6 mm ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A ให้นำหัวกดยางค้างไว้ 3 วินาทีแล้วอ่านค่าที่ได้

#### 3.3.4.2 การวัดค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

ทดสอบโดยใช้ขึ้นทดสอบรูปดัมเบล ขนาดความยาว 115 mm กว้าง  $6 \pm 0.4$  mm แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงที่อัตราการดึง  $500 \pm 50$  mm/min รายงานผลเป็นแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด ( $\text{Kgf/cm}^2$ )

#### 3.3.4.3 การวัดค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation at Break)

ทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง แต่อ่านระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยืดจนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

#### 3.3.4.4 การวัดค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)

ทดสอบโดยใช้ขึ้นทดสอบที่ทำเป็นมุมขนาดความยาว 100 mm แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงที่อัตราการดึง  $500 \pm 50$  mm/min รายงานผลเป็นแรงดึงต่อความหนา ( $\text{Kgf/cm}$ )



### 3.3.5 ศึกษาสมบัติการบิดรูปที่เกิดจากการกดของยางผสม

การทดสอบการบิดรูปจากการกด ซึ่งทดสอบมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง  $29 \pm 0.5$  mm หนา  $12.5 \pm 0.5$  mm อัดให้บิดรูปไป 25% ของความหนาแล้วนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 22 ชั่วโมงเมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากแผ่นอัดทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงวัดความหนา รายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิม

### 3.3.6 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางผสม

ทดสอบความทนทานต่อความร้อนของยางที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 70 ชั่วโมงในตู้อบ Oven เมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากตู้ทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีแล้วจึงนำไปทดสอบความทนทานต่อแรงดึง, ความทนทานต่อการยืดขาดและวัดความแข็งโดยรายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าที่เปลี่ยนแปลงไป

### 3.3.7 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม

ทดสอบความทนทานต่อน้ำมันชนิด Oil 1 ของยางที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 70 ชั่วโมงในตู้อบ Oven เมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากตู้ทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีแล้วจึงนำไปทดสอบความทนทานต่อแรงดึง, ความทนทานต่อการยืดขาดและวัดความแข็งโดยรายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าที่เปลี่ยนแปลงไป

### 3.3.8 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อโอโซนของยางผสม

ทดสอบความทนทานต่อโอโซนโดยนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปอบในตู้โอโซนที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C} \times 50$  ppm ยืดยาง 20% เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็นำชิ้นทดสอบมาเปรียบเทียบกับยางมาตรฐาน

### 3.3.9 ทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์

นำยางคอมปาวด์ไปทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์ ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Compression Molding)

### 3.3.10 ศึกษาต้นทุนราคายางคอมปาวด์

### 3.4 การเรียกชื่อสูตรยางในการทดลอง

- HNV หมายถึง สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC
- HN หมายถึง สูตรยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR
- CV หมายถึง ระบบการ วัดคาไนซ์ยางแบบ Conventional
- EV หมายถึง ระบบการ วัดคาไนซ์ยางแบบ EV
- ตัวเลข หมายถึง ปริมาณยาง NBR/PVC หรือ NBR ในสูตรยาง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

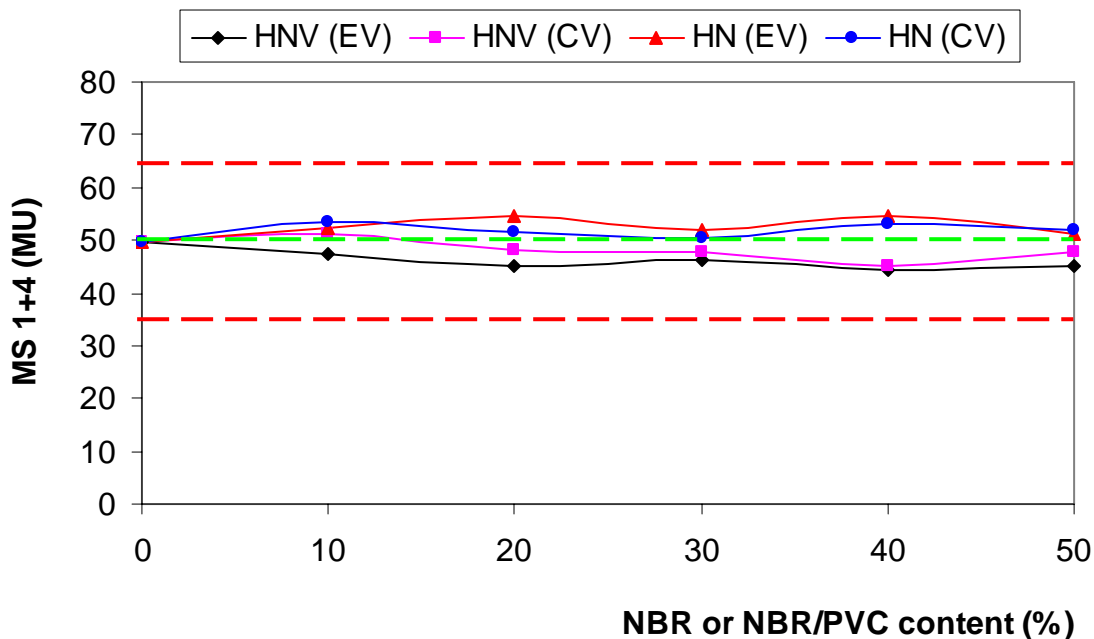
#### 4.1 สมบัติด้านการไหลและความหนืดของยาง

ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV แล้วนำมาทดสอบด้วยเครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์โดยใช้อุณหภูมิ 125°C และใช้โรเตอร์ขนาดเล็กในการทดสอบให้ความร้อนแก่ยางเป็นเวลา 1 นาที (Pre-Heat) แล้วเดินเครื่องทดสอบและอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากโรเตอร์หมุนไปได้ 4 นาที รายงานผลค่าความหนืดของยางโดยมีหน่วยเป็น Mooney Unit (MU) แสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

ค่าความหนืดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ค่าความหนืดของยาง (MS 1+4 (MU))			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	49.80	-	49.80	-
10	47.40	51.26	52.26	53.42
20	45.25	48.26	54.65	51.59
30	46.23	47.59	51.95	50.26
40	44.26	45.26	54.55	53.21
50	45.11	47.62	51.12	51.98



จากภาพที่ 4.1

แสดงค่าความหนืดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นค่าความหนืดของยาง (MS 1+4) มีแนวโน้มลดลงซึ่งหมายความว่ายางมีคุณสมบัติในการไหลได้ง่ายขึ้นที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นจะทำให้มีปริมาณ PVC มากขึ้นด้วยยางจึงไหลได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR พบว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาระบบการวัลคาไนซ์พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีความหนืดสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย

#### 4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์โดยใช้อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 7 นาที โดยเครื่องทดสอบจะรายงานผลเป็นค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ระยะเวลาที่ทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 10 (T10) และระยะเวลาที่ทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 (T90) แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2

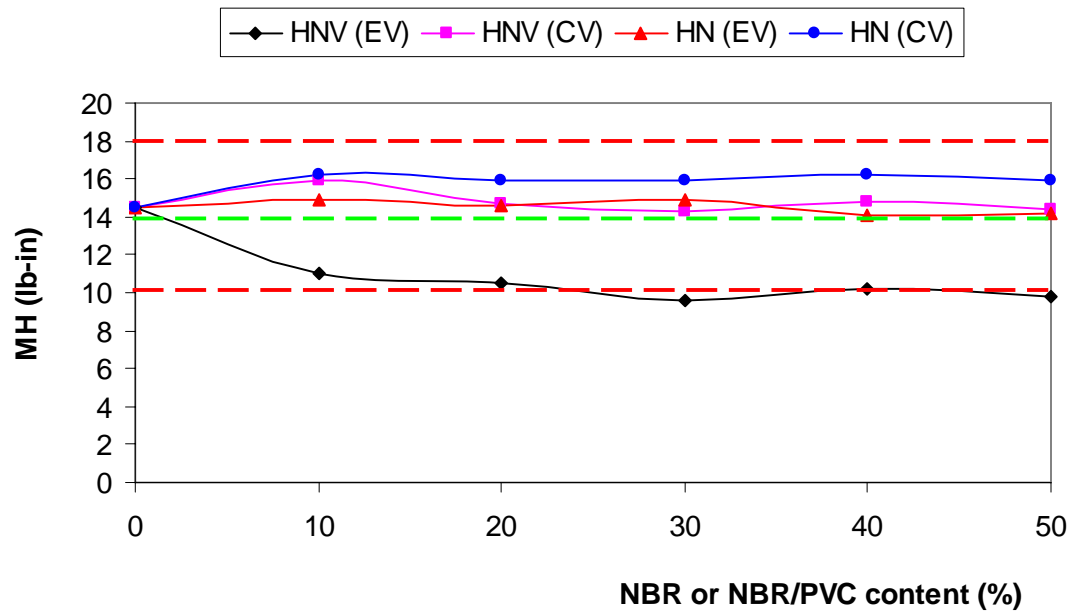
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง					
	HN (EV)			HN (CV)		
	MH (lb-in)	T10 (min)	T90 (min)	MH (lb-in)	T10 (min)	T90 (min)
0	14.50	1.75	4.78	-	-	-
10	11.01	2.04	5.39	15.95	1.73	6.15
20	10.52	1.75	5.28	14.72	1.82	6.12
30	9.59	1.60	5.11	14.26	1.67	5.92
40	10.20	1.84	5.32	14.82	1.72	5.85
50	9.82	1.79	5.21	14.35	1.94	5.81

ตารางที่ 4.3

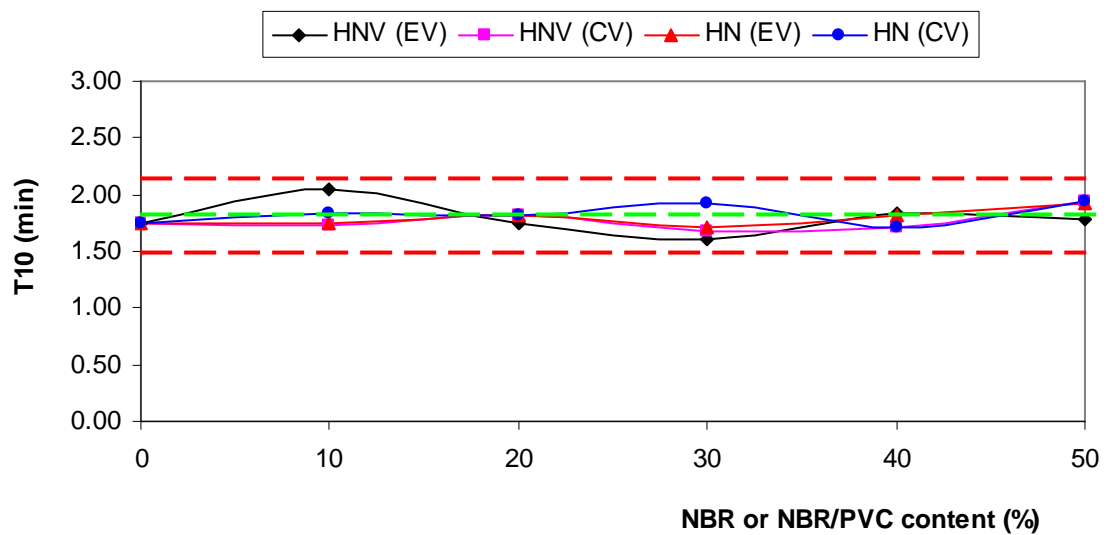
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม HNBR กับ NBR ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง					
	HN (EV)			HN (CV)		
	MH (lb-in)	T10 (min)	T90 (min)	MH (lb-in)	T10 (min)	T90 (min)
0	14.50	1.75	4.78	-	-	-
10	14.92	1.74	4.82	16.25	1.84	5.99
20	14.56	1.82	4.78	15.91	1.81	5.81
30	14.85	1.71	4.92	15.95	1.92	5.56
40	14.10	1.81	4.88	16.21	1.72	5.98
50	14.22	1.92	5.12	15.94	1.95	6.12



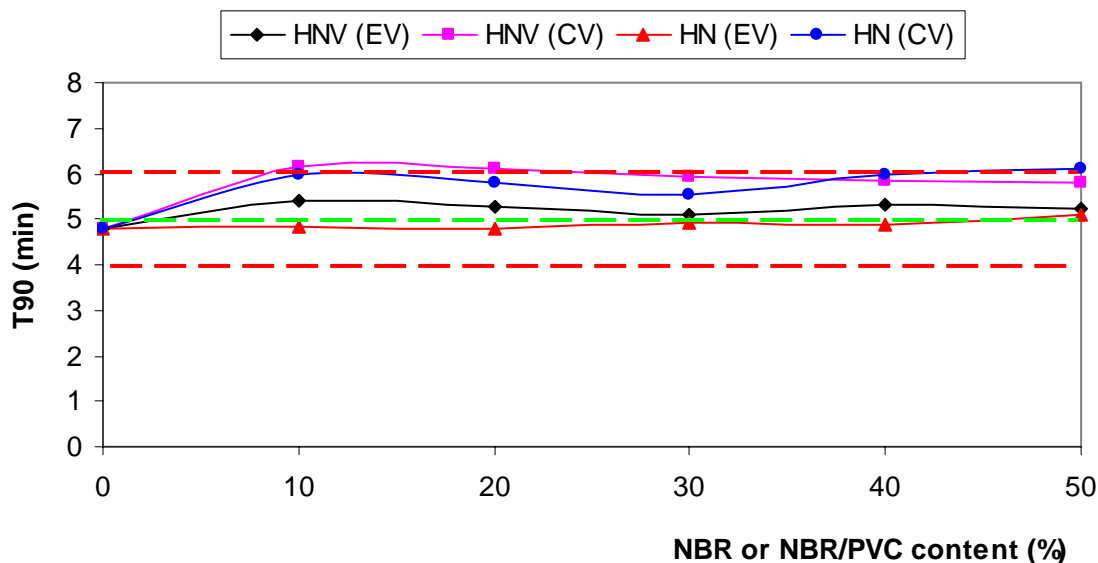
ภาพที่ 4.2

ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.3

ค่า 10% cure time (T10) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.4

ค่า 90% cure time (T90) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางที่อัตราส่วนต่างๆ กัน โดยภาพที่ 4.2 แสดงผลของค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ของยางที่อัตราส่วนต่างๆ กันจากกราฟเส้นตรง จะพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้น แนวโน้มค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ของยางมีแนวโน้มลดลงซึ่งมีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PVC ในกรณีที่เพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR พบว่าค่าแรงบิดสูงสุด (MH) มีแนวโน้มไม่ต่างกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบระบบของการวัลคาไนซ์ของยางระหว่าง CV กับ EV พบว่าระบบ CV จะมีค่าแรงบิดสูงสุด (MH) สูงกว่าที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV มีการใช้ Sulphur สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ทำให้ความเข้มข้นของพันธะ Sulphur มากกว่า ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) จึงสูงกว่าภาพที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่า 10% Cure Time (T10) และ 90% Cure Time (T90) จะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้น ไม่ได้มีผลต่อลักษณะการสุกของยางแต่อย่างใด ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV จะทำให้อย่างสุกเร็วกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV เล็กน้อย ค่า 90% Cure Time (T90) ต่ำกว่าอันเป็นผลมาจากการใช้สารตัวเร่งมากกว่าระบบ CV ทำให้อย่างสุกเร็วขึ้น

### 4.3 สมบัติเชิงกลของยาง

ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV นำยางคอมเพาไรต์ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เพื่อเตรียมขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าไฮดรอลิคโดยใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 12 นาที สำหรับขึ้นทดสอบความแข็งใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 10 นาทีสำหรับขึ้นทดสอบวัดความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation at Break) และ ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) และใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 25 นาทีสำหรับขึ้นทดสอบวัดความทนทานต่อการผิรูปร่าง

#### 4.3.1 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness)

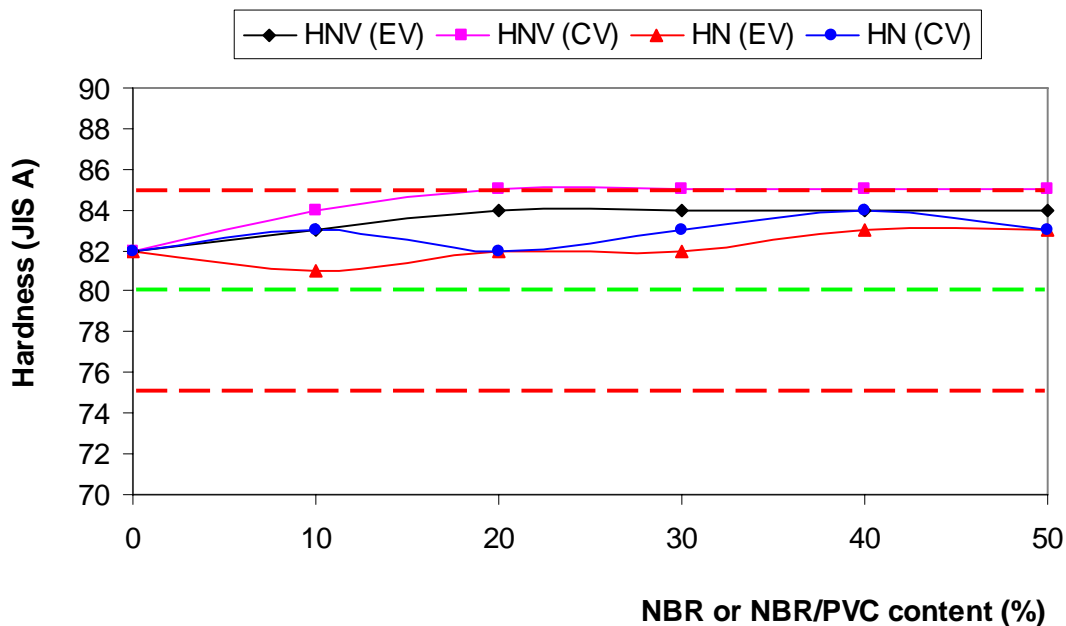
เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ Shore A โดยใช้ขึ้นทดสอบที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 6 mm. ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A ให้หัวกดยางค้างไว้ 3 วินาทีแล้วอ่านค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4

ค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ค่าความแข็งของยาง (JIS A)			
	HN (EV)	HN (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	82	-	82	-
10	83	84	81	83
20	84	85	82	82
30	84	85	82	83
40	84	85	83	84
50	84	85	83	83





ภาพที่ 4.5

ค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้น ยางจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของ PVC ทำให้ยางมีความเป็นพลาสติกมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR ค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาระบบการวัลคาไนซ์พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความแข็งสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย เนื่องจากระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV มีความเข้มข้นของพันธะ Sulphur สูงกว่า ยางจึงมีค่าความแข็งสูงกว่า

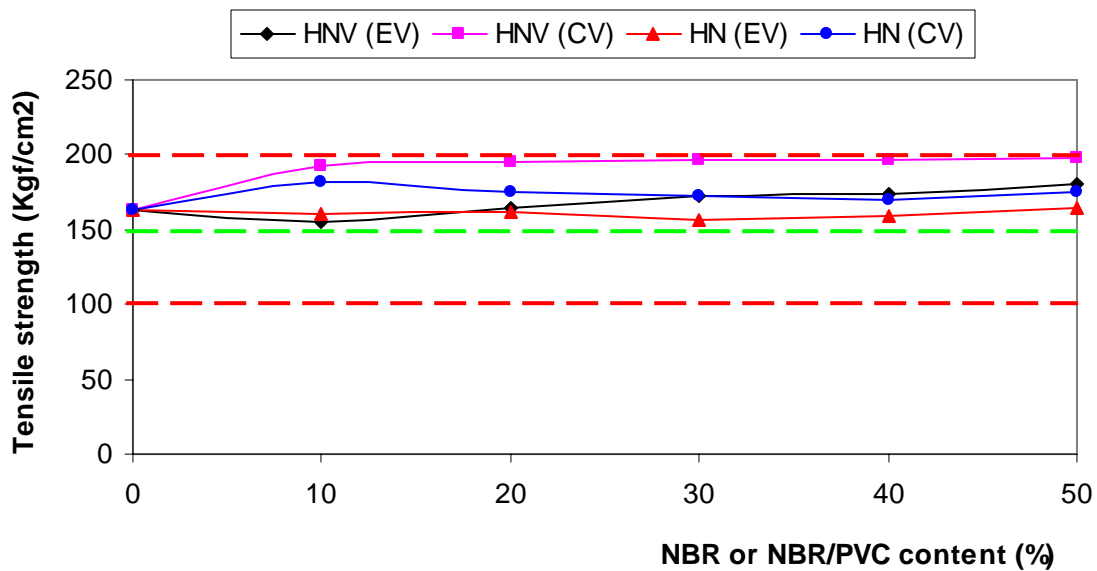
#### 4.3.2 การทดสอบค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

ทดสอบโดยใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลขนาดความยาว 115 mm กว้าง  $6 \pm 0.4$  mm แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงที่อัตราการดึง  $500 \pm 50$  mm/min รายงานผลเป็นแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด ( $\text{Kgf/cm}^2$ ) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5

ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	163	-	163	-
10	155	193	160	182
20	165	195	162	175
30	172	196	156	172
40	174	196	159	170
50	180	198	165	175



ภาพที่ 4.6

ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.6 แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้น จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PVC ทำให้ยางมีความเป็นพลาสติกมากยิ่งขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของพันธะ sulphur เช่นกัน ยางจึงมีความแข็งแรงมากกว่า ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) จึงสูงกว่า

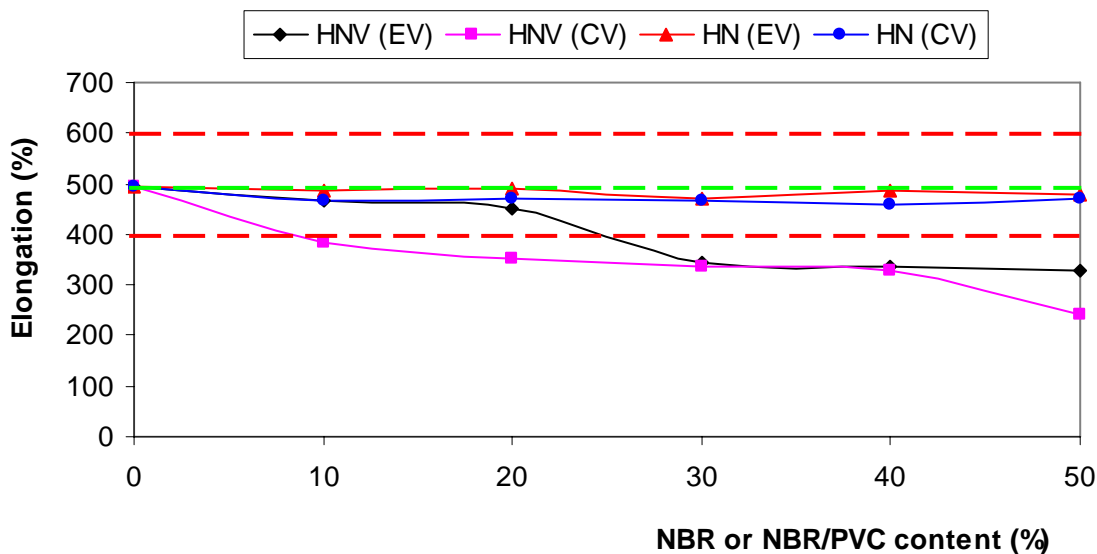
#### 4.3.3 การทดสอบค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation at Break)

ทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงแต่อ่านระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยืดจนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6

ค่าความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ค่าความทนทานต่อการยืดขาด (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	494	-	494	-
10	467	385	485	467
20	450	352	492	472
30	346	335	472	465
40	335	330	485	460
50	330	243	480	470



ภาพที่ 4.7

ค่าความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.7 แสดงค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน จากกราฟเส้นตรงพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้น ค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เป็นเพราะว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC ทำให้ระดับปริมาณของ PVC มากขึ้น ยางจะสูญเสียคุณสมบัติความยืดหยุ่นไป ความสามารถในการยืดก็จะลดลง แต่การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR ค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) ต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย

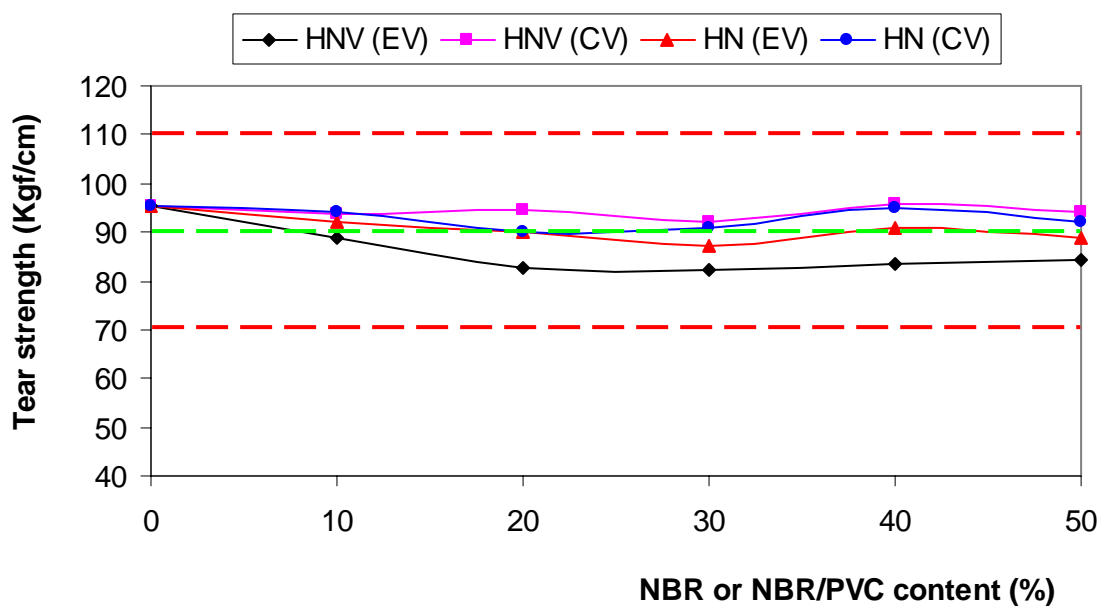
#### 4.3.4 การทดสอบค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

ทดสอบโดยใช้ชิ้นทดสอบที่ทำเป็นมุมขนาดความยาว 100 mm แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงที่อัตราการดึง  $500 \pm 50$  mm/min รายงานผลเป็นแรงดึงต่อความหนา (Kgf/cm) แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7

ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Kgf/cm)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	95.20	-	95.20	-
10	88.90	93.70	92.12	94.31
20	82.80	94.40	90.08	90.14
30	82.40	92.15	87.14	91.51
40	83.50	95.62	91.24	95.24
50	84.26	94.35	89.95	92.01



ภาพที่ 4.8

ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.8 แสดงค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR ไม่ได้ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางแต่อย่างใด โดยผลทดสอบที่ได้มี

แนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของพันธะ sulphur

#### 4.4 สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง

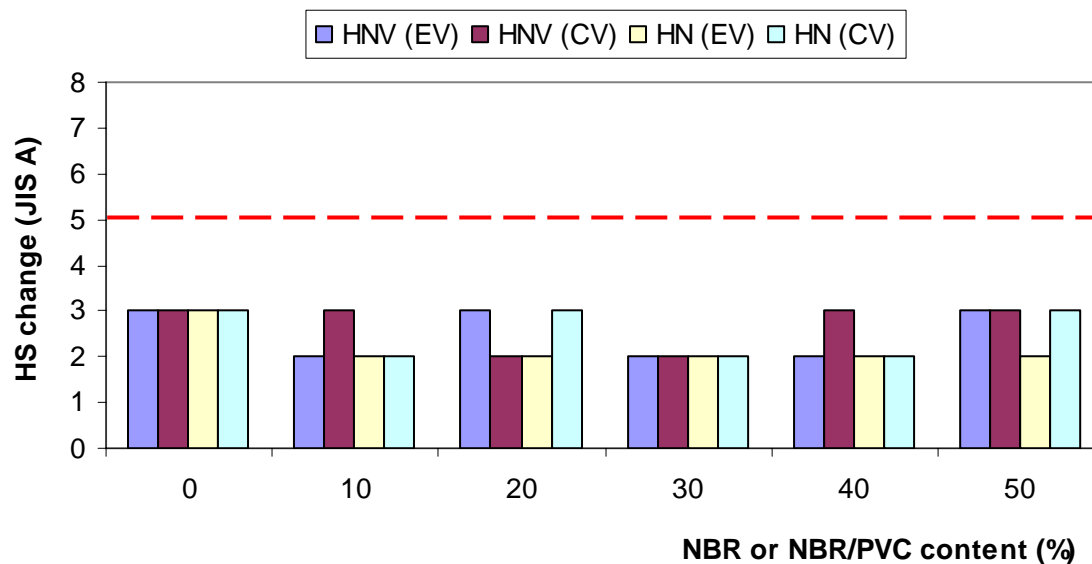
ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV แล้วทดสอบความทนทานต่อความร้อนของยางที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมงในตู้อบ Oven เมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากตู้ทันทีตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีแล้วจึงนำไปทดสอบ ความทนทานต่อแรงดึง, ความทนทานต่อการยืดขาดและวัดความแข็งโดยรายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าที่เปลี่ยนแปลงไป

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง (Hardness Change) หลังจากนำยางไปอบไว้ในตู้ Oven ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.8

##### ตารางที่ 4.8

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง (JIS A)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	3	-	3	-
10	2	3	2	2
20	3	2	2	3
30	2	2	2	2
40	2	3	2	2
50	3	3	2	3



ภาพที่ 4.9

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

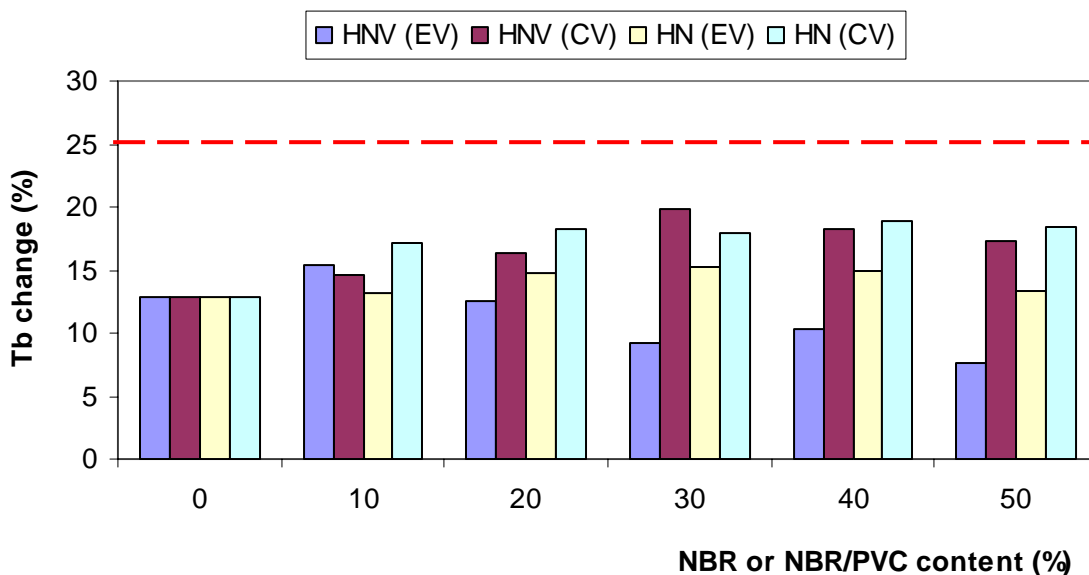
จากภาพที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง  
NBR/PVC และ NBR นอกจากนี้การแปรระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบ คือ CV และ EV  
ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70  
ชั่วโมงแต่อย่างใด

4.4.2 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength change) หลังจากนำยางไปอบไว้ในตู้ Oven ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	12.79	-	12.79	-
10	15.41	14.55	13.21	17.15
20	12.57	16.29	14.71	18.24
30	9.28	19.88	15.24	17.98
40	10.28	18.24	14.98	18.95
50	7.68	17.24	13.29	18.44



ภาพที่ 4.10

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง



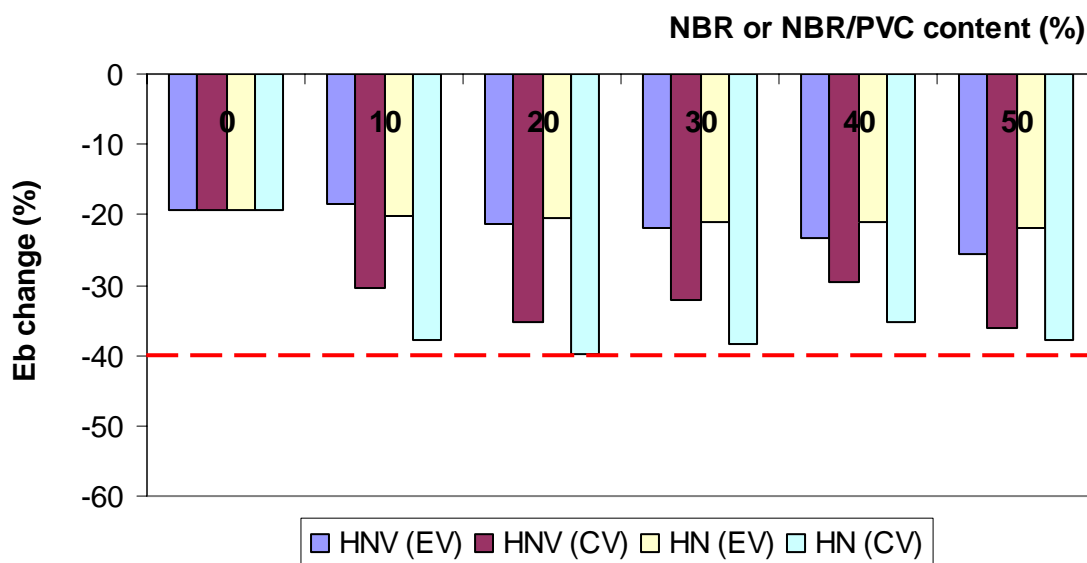
จากภาพที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กันหลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยางอย่างเด่นชัด ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์ แบบ EV จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยางต่ำกว่าระบบ CV เนื่องจากระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV จะมีคุณสมบัติด้านการทนทานต่อความร้อนดีกว่า CV ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ต่ำกว่า

4.4.3 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change) หลังจากนำยาง ไปอบไว้ในตู้ Oven ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	-19.24	-	-19.24	-
10	-18.51	-30.51	-20.20	-37.85
20	-21.24	-35.16	-20.58	-39.84
30	-21.98	-32.17	-21.11	-38.42
40	-23.26	-29.57	-20.98	-35.14
50	-25.64	-36.24	-22.02	-37.95



ภาพที่ 4.11

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากอบไว้ในตู้ Oven 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับภาพที่ 4.10

#### 4.5 สมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยาง

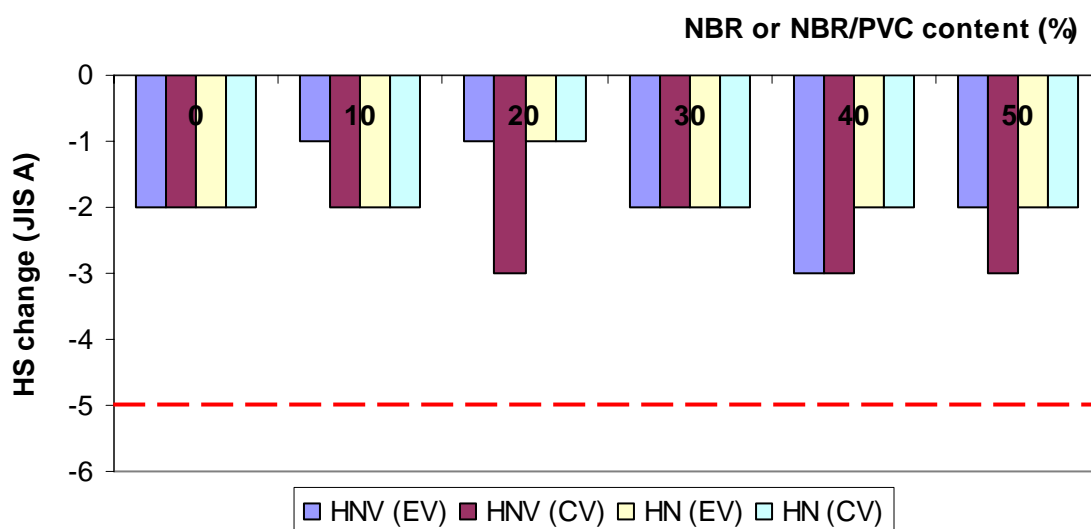
ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV หลังจากนั้นนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 แล้วอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมงในตู้อบ Oven เมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากตู้ทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีแล้วจึงนำไปทดสอบความทนทานต่อแรงดึง, ความทนทานต่อการยืดขาดและวัดความแข็ง โดยรายงานผลในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ของค่าที่เปลี่ยนแปลงไป

4.5.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง (Hardness Change) หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	ค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งของยาง (JIS A)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	-2	-	-2	-
10	-1	-2	-2	-2
20	-1	-3	-1	-1
30	-2	-2	-2	-2
40	-3	-3	-2	-2
50	-2	-3	-2	-2



ภาพที่ 4.12

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

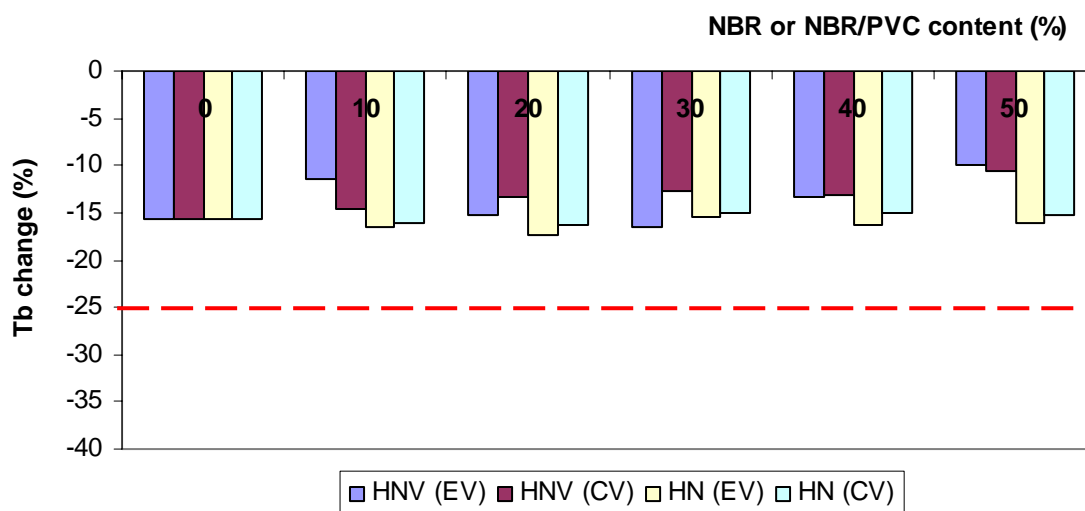
จากภาพที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่ม อัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR นอกจากนี้การแปรระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบ คือ CV และ EV ก็ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยางแต่อย่างใด

4.5.2 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	-15.74	-	-15.74	-
10	-11.43	-14.58	-16.57	-15.98
20	-15.24	-13.26	-17.25	-16.20
30	-16.60	-12.65	-15.42	-14.98
40	-13.24	-13.11	-16.25	-15.11
50	-10.02	-10.54	-15.98	-15.14



ภาพที่ 4.13

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึงของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

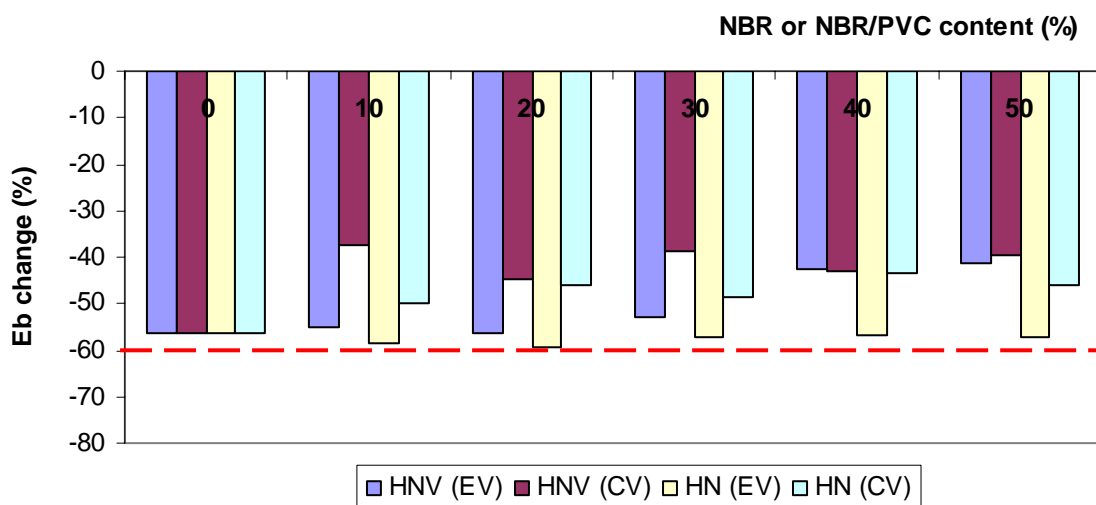
จากภาพที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนผสมยาง NBR/PVC และ NBR ไม่ได้ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) อย่างเด่นชัด ในขณะที่แปรระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของพันธะ Sulphur ที่มากกว่าทำให้มีความสามารถในการทนน้ำมันดีกว่า

4.5.3 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change)  
หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่  
4.13

ตารางที่ 4.13

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อการยืดขาด (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	-56.39	-	-56.39	-
10	-55.18	-37.46	-58.51	-49.85
20	-56.32	-44.77	-59.14	-45.98
30	-52.97	-38.58	-57.21	-48.75
40	-42.65	-42.95	-56.98	-43.58
50	-41.25	-39.60	-57.14	-46.11



ภาพที่ 4.14

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อการยืดขาดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

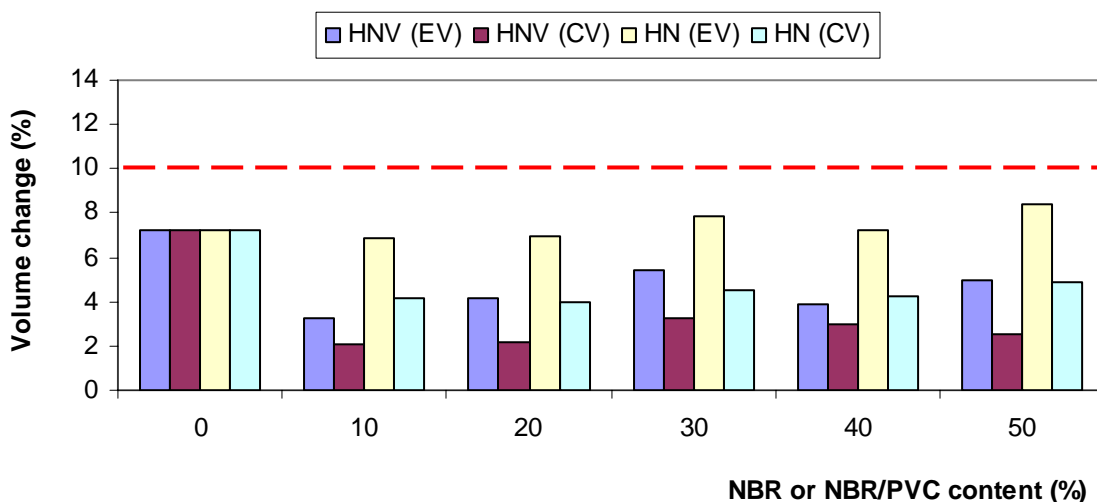
จากภาพที่ 4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อการยืดขาด (Elongation Change) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับภาพที่ 4.13

4.5.4 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

% Content	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	7.21	-	7.21	-
10	3.29	2.07	6.89	4.15
20	4.12	2.15	6.95	3.98
30	5.39	3.21	7.85	4.56
40	3.84	2.98	7.24	4.25
50	4.98	2.49	8.41	4.85



ภาพที่ 4.15

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน  
หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) ของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน หลังจากนำยางไปแช่ในน้ำมันชนิด Oil 1 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR ไม่ได้ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) อย่างเด่นชัด ในขณะที่แปรระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) ต่ำกว่าเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของพันธะ Sulphur ที่มากกว่าทำให้เกิดการบวมพองในน้ำมันน้อยกว่า



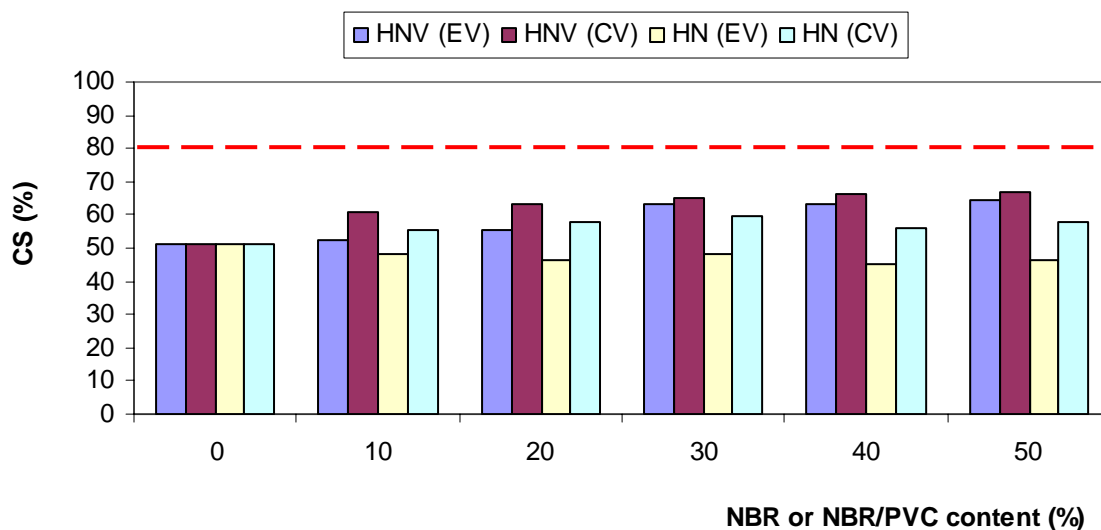
#### 4.6 สมบัติการผิดรูปที่เกิดจากการกดของยาง

ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV หลังจากนั้นทดสอบการผิดรูปจากการกดขึ้นทดสอบมีลักษณะ เป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง  $29 \pm 0.5$  mm หนา  $12.5 \pm 0.5$  mm อัดให้ผิดรูปไป 25% ของความหนาแล้วนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $100$  °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงเมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากแผ่นอัดทันทีตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีหลังจากนั้นจึงวัดความหนา โดยรายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิมแสดงผลดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15

ค่าการผิดรูปจากการกดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

% Content	ค่าการผิดรูปจากการกด (%)			
	HNV (EV)	HNV (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	50.94	-	50.94	-
10	52.14	61.09	48.25	55.69
20	55.62	63.25	46.25	57.85
30	63.15	64.78	47.95	59.85
40	63.29	66.29	45.25	56.24
50	64.31	66.98	46.59	57.84



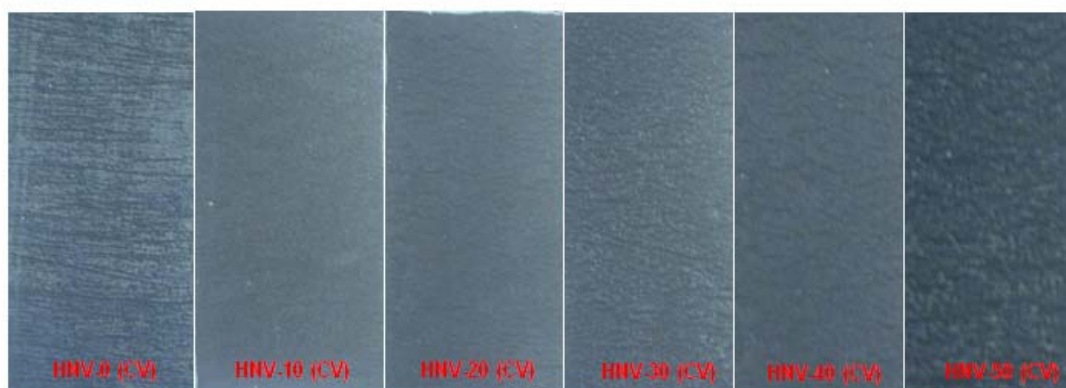
ภาพที่ 4.16

ค่าการผิดรูปจากการกดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.16 แสดงค่าการผิดรูปจากการกดของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นจะทำให้ค่าการผิดรูปจากการกดของยางเพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะว่ามีส่วนของ PVC มากขึ้นทำให้ยางสูญเสียคุณสมบัติความยืดหยุ่นไปเมื่อได้รับแรงกดความสามารถในการคืนรูปจึงด้อยลงไปทำให้ค่า Compression Set (CS) สูงขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR ค่าการผิดรูปจากการกดของยางมีค่าใกล้เคียงกันในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบ คือ CV และ EV มีผลทดสอบที่ใกล้เคียงกัน

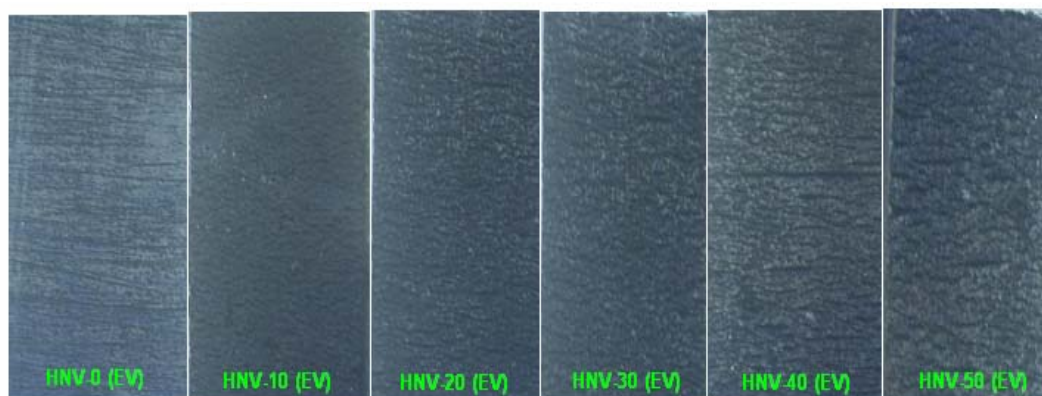
#### 4.7 สมบัติความทนทานต่อโอโซน

ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV หลังจากนั้นนำยางคอมปาว์ดที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าไฮดรอลิคโดยใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 10 นาที นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปอบในตู้โอโซนที่อุณหภูมิ 40 °C x 50 ppm ยึดยาง 20% เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็นำชิ้นทดสอบมาเปรียบเทียบผิวกับยางมาตรฐาน ซึ่งแสดงผลดังภาพที่ 4.17, 4.18, 4.19 และ 4.20



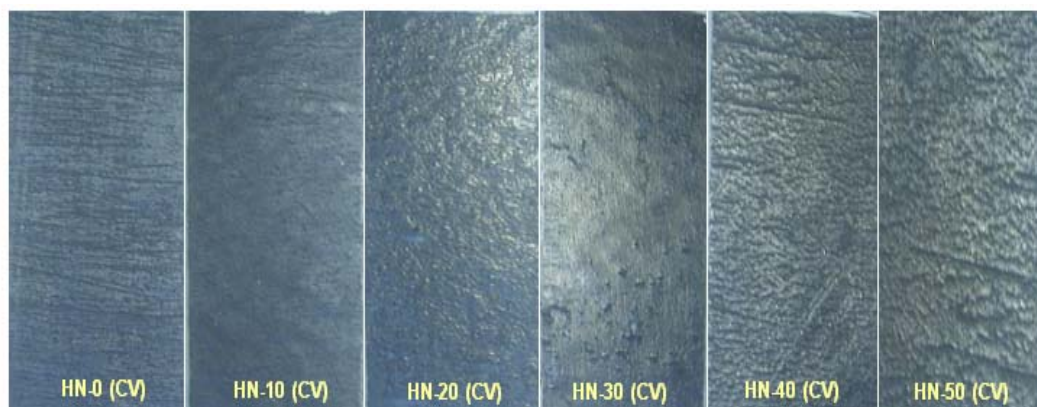
ภาพที่ 4.17

ความทนทานต่อโอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



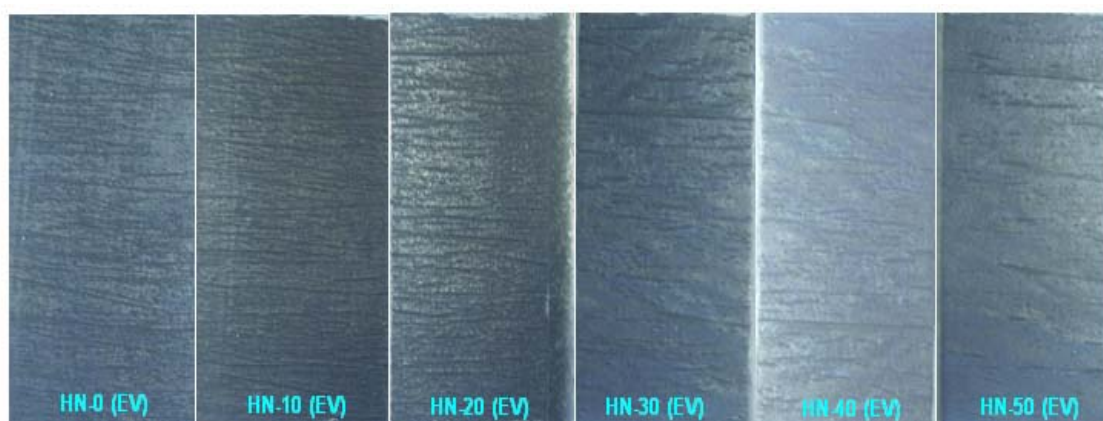
ภาพที่ 4.18

ความทนทานต่อโอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.19

ความทนทานต่อโอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR  
ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.20

ความทนทานต่อโอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR  
ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.17-4.20 แสดงค่าความทนทานต่อโอโซนของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC และ NBR ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนของยาง NBR/PVC มากขึ้น ยางมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วนการผสม 60/40 และ 50/50 ในขณะที่การผสมยาง NBR จะพบรอยแตกร้าวของยางได้ชัดเจนกว่าการผสมยาง NBR/PVC และ ปริมาณของรอยแตกร้าวก็มากกว่า ซึ่งเป็นเพราะว่ายาง NBR มีพันธะคู่ที่มากกว่า NBR/PVC ทำให้โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาได้มากกว่า จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่มากกว่า เมื่อพิจารณาระบบการ

วัลคาไนซ์ พบว่าทั้ง 2 ระบบคือ Conventional และ EV มีลักษณะการแตกร้าวที่เหมือนกัน ดังนั้นระบบการวัลคาไนซ์จึงไม่มีผลต่อความทนทานต่อไอโซนของยาง

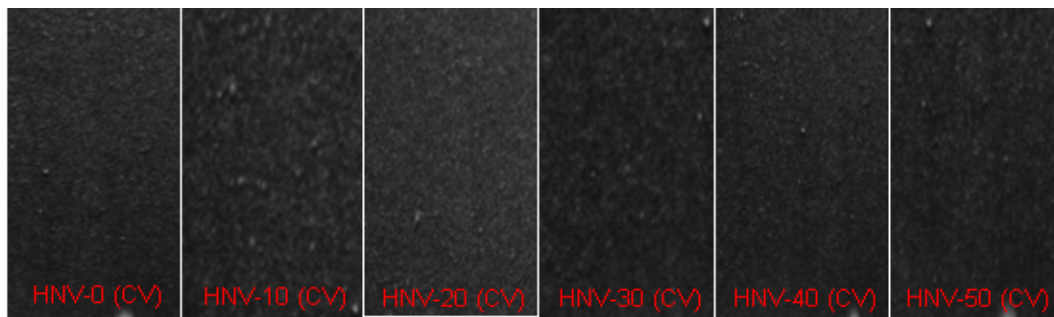
#### 4.8 สมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำ

ทำการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV หลังจากนั้นนำยางคอมเพาไรด์ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เพื่อเตรียมขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮโดรลิคโดยใช้อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 12 นาที นำขึ้นทดสอบไปทดสอบวัดการกระจายตัวของเขม่าดำด้วยเครื่อง Disper Grader 1000 กำลังขยาย 100 เท่า ผลการทดสอบจะรายงานค่าระดับการกระจายตัวของเขม่าดำ (ค่า X) และ ค่าขนาดของเขม่าดำที่จับตัวเป็นก้อน (ค่า Y) แสดงผลดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16

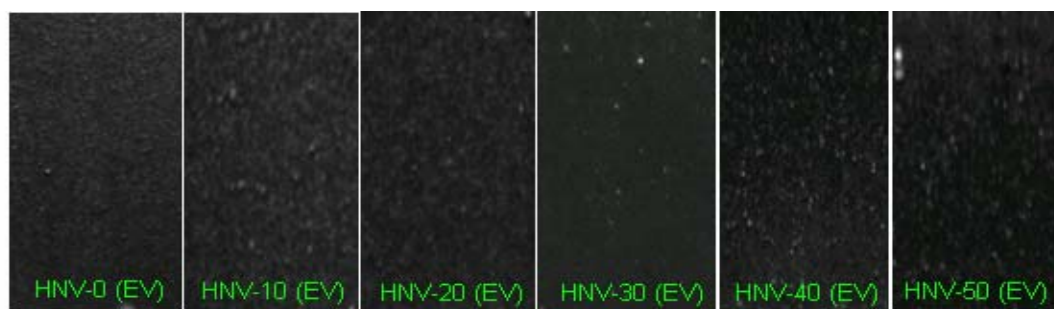
การกระจายตัวเขม่าดำของยางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

Content (%)	การกระจายตัวเขม่าดำ							
	HNV (EV)		HNV (CV)		HN (EV)		HN (CV)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	6.13	8.75	-	-	6.13	8.75	-	-
10	6.14	8.77	6.14	8.76	6.12	8.75	6.11	8.76
20	6.17	8.74	6.16	8.74	6.15	8.74	6.17	8.73
30	6.11	8.75	6.12	8.74	6.11	8.73	6.13	8.72
40	6.18	8.76	6.16	8.75	6.17	8.75	6.16	8.73
50	6.20	8.77	6.18	8.77	6.18	8.77	6.19	8.76



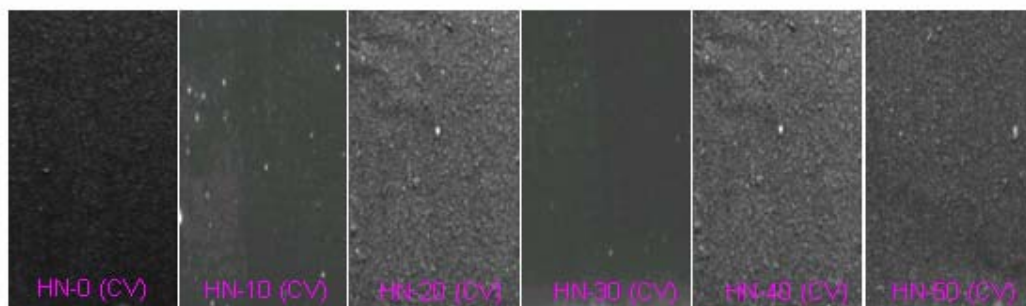
ภาพที่ 4.21

การกระจายตัวของเม็ดดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC  
ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



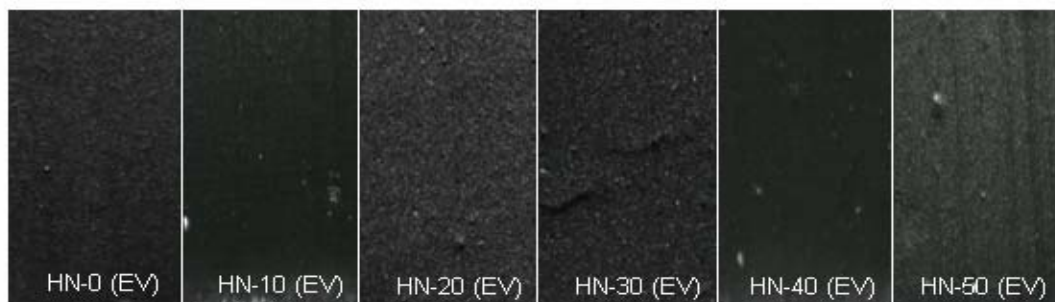
ภาพที่ 4.22

การกระจายตัวของเม็ดดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC  
ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.23

การกระจายตัวของเม็ดดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR  
ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์แบบ Conventional ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.24

การกระจายตัวของเขม่าดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR  
ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

จากตารางที่ 4.16 แสดงสมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำของยางผสมระหว่าง HNBR กับ NBR/PVC และ NBR พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR ไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายตัวของเขม่าดำ โดยมีค่าระดับการกระจายตัวของเขม่าดำ (ค่า X) อยู่ที่ประมาณ 6.15 และมีค่าขนาดของเขม่าดำที่จับตัวเป็นก้อน (ค่า Y) อยู่ที่ประมาณ 8.75 นอกจากนี้การแปรระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบ คือ CV และ EV ก็ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำของยางเช่นกัน

#### 4.9 การทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์

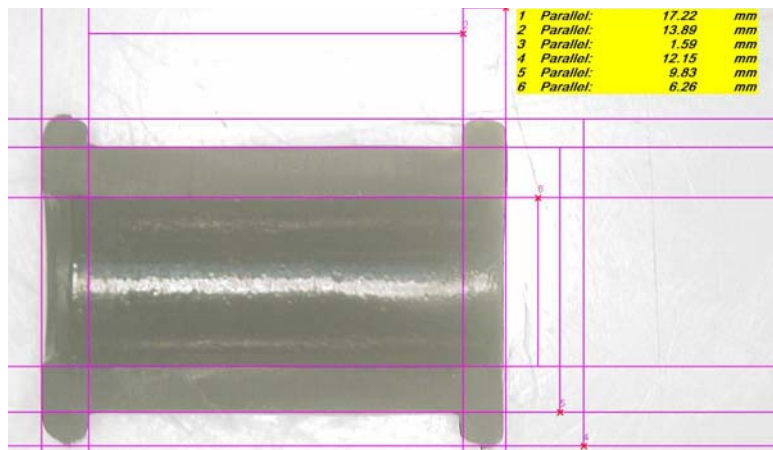
จากการทดลองแปรปริมาณอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง HNBR กับ NBR และ HNBR กับ NBR/PVC ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 ตามลำดับและแปรระบบการวัลคาไนซ์ยาง 2 ระบบ คือ Conventional และ EV แล้วนำยางไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามที่ได้กล่าวผ่านมานั้น เช่น สมบัติด้านการไหล, ลักษณะการวัลคาไนซ์, สมบัติเชิงกล, สมบัติความทนทานต่อความร้อนและน้ำมัน, สมบัติความทนทานต่อโอโซน เป็นต้น จะพบว่า การนำยาง HNBR ผสมกับ NBR ที่อัตราส่วน 90/10 โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ผลทดสอบที่ได้จะผ่านมาตรฐานของลูกค้าทั้งหมด และค่าทดสอบที่ได้มีแนวโน้มจะอยู่ค่ากลางตามมาตรฐานของลูกค้า จึงนำยางที่ได้ไปทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์ โดยผลการเช็คขนาดของผลิตภัณฑ์แสดงผลดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17  
ขนาดของผลิตภัณฑ์

Check point	1	2	3	4	5	6
standard	16.40-17.60	13.40-14.60	1.20-1.80	11.40-12.60	9.50-10.50	5.80-6.90
1	17.11	13.98	1.52	12.12	10.03	6.26
2	17.12	13.89	1.51	12.12	9.86	6.26
3	17.11	14.02	1.52	12.13	9.83	6.30
4	17.13	14.02	1.53	12.13	9.90	6.27
5	17.14	13.80	1.52	12.12	9.99	6.26
6	17.11	14.09	1.52	12.11	10.03	6.32
7	17.12	13.86	1.53	12.12	9.94	6.32
8	17.13	13.82	1.54	12.10	9.86	6.28
9	17.11	13.92	1.51	12.13	9.95	6.29
10	17.12	13.97	1.52	12.12	9.98	6.28
11	17.15	14.03	1.51	12.12	10.02	6.28
12	17.14	14.06	1.53	12.13	9.95	6.28
13	17.11	13.98	1.52	12.13	9.86	6.29
14	17.12	13.88	1.52	12.13	9.94	6.31
15	17.12	13.95	1.53	12.12	9.98	6.29
16	17.13	13.93	1.52	12.11	9.96	6.29
avg	17.12	13.95	1.52	12.12	9.94	6.28
result	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

จากตารางที่ 4.17 แสดงผลการเช็คขนาดของผลิตภัณฑ์ โดยทำการวัดค่าทั้งหมด 6 จุด ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.25 จากค่าในตารางจะพบว่าทุกจุดและทุก Cavity ที่ทำการวัดจะผ่านตามมาตรฐานของลูกค้ำทั้งหมด





ภาพที่ 4.25  
การวัดขนาดของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 4.26  
รูปตัวอย่างผลิตภัณฑ์

#### 4.10 การศึกษาต้นทุนราคายางคอมเปา์วด

วัตถุประสงค์ของการทำการทดลองในครั้งนี้ก็เพื่อที่จะลดราคาของยางคอมเปา์วดลง เนื่องจากยาง HNBR ที่ใช้ คือ ZETPOL 1020 ราคาประมาณ 977.79 บาท/กิโลกรัม เมื่อนำยาง ZETPOL 1020 มาผสมเป็นยางคอมเปา์วด ทำให้ราคายางคอมเปา์วดอยู่ที่ประมาณ 578.66 บาท/กิโลกรัม การที่จะลดราคายางคอมเปา์วดลงทำได้โดยการผสมกับยางที่ราคาถูกกว่า การนำยางสองชนิดมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นยางผสม (Rubber Blend) การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะทำได้ยาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางผสมที่ได้มีคุณสมบัติไม่ดี ดังนั้นการที่จะผสมยางสองชนิดเข้าด้วยกันต้องคำนึงถึงสภาพของความเข้ากันได้ (Compatibility) ของยางที่จะนำมาผสมกัน ยางที่มีคุณสมบัติเชิงกลและสภาพของความเข้ากันได้ใกล้เคียงกับยาง HNBR คือ ยาง NBR/PVC ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ยาง 1203D ราคาประมาณ 127.20 บาท/กิโลกรัมและ ยาง NBR ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ยาง N230S ราคาประมาณ 75.10 บาท/กิโลกรัม จากผลการทดลองแปรอัตราส่วนการผสมยางและแปรระบบการวัลคาไนซ์ 2 ระบบ คือ Conventional และ EV ราคายางคอมเปา์วดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กันแสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18

ราคายางคอมเปา์วดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน

Content (%)	ราคายางคอมเปา์วด (บาท/กิโลกรัม)			
	HN (EV)	HN (CV)	HN (EV)	HN (CV)
0	578.66	-	578.66	-
10	530.56	529.33	527.36	526.13
20	482.46	481.23	476.06	474.83
30	434.36	433.13	424.76	423.53
40	386.27	385.04	373.47	372.24
50	338.17	336.94	322.17	320.94

จากตารางที่ 4.18 จะพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนผสมของยาง NBR/PVC และ NBR จะทำให้ราคาของยางคอมปาวด์ถูกลง ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าราคาของยาง NBR/PVC และ NBR จะมีราคาถูกกว่ายาง HNBR ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้น ราคาของคอมปาวด์จึงถูกลง เมื่อพิจารณาระหว่างราคาของยางของ NBR/PVC และ NBR ก็จะพบว่าราคาของ NBR จะถูกกว่า NBR/PVC จึงทำให้ราคาของคอมปาวด์ที่มีอัตราส่วนผสมของ NBR จะมีราคาถูกกว่ายางที่มีการผสม NBR/PVC ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถนำมาแทนยาง HNBR ได้คือ การนำยาง HNBR ผสมกับยาง NBR ที่อัตราส่วนผสม 90/10 โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ราคาของคอมปาวด์ประมาณ 527.36 บาท/กิโลกรัม ถ้าเทียบกับราคาของคอมปาวด์ที่ใช้ยาง HNBR เพียงอย่างเดียวราคาประมาณ 578.66 บาท/กิโลกรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงได้ 8.86%

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ผลของสมบัติด้านการไหลและความหนืดของยาง

5.1.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นค่าความหนืดของยาง (MS 1+4) มีแนวโน้มลดลง

5.1.2 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดของยาง (MS 1+4)

5.1.3 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความหนืดสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย

#### 5.2 ผลของลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

5.2.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นค่าแรงบิดสูงสุด (MH) มีแนวโน้มลดลง

5.2.2 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ของยาง

5.2.3 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าแรงบิดสูงสุด (MH) สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV

5.2.4 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่า 10% Cure Time (T10) และ 90% Cure Time (T90)

5.2.5 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV จะทำให้ยางสุกเร็วกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV เล็กน้อย

### 5.3 ผลของสมบัติเชิงกลของยาง

5.3.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นค่าความแข็งของยางก็เพิ่มขึ้นด้วย

5.3.2 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของยาง

5.3.3 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความแข็งสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย

5.3.4 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางก็เพิ่มขึ้นด้วย

5.3.5 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยาง

5.3.6 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV

5.3.7 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) ของยางมีแนวโน้มลดลง

5.3.8 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) ของยาง

5.3.9 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation) ต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย

5.3.10 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยาง

5.3.11 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV เล็กน้อย

#### 5.4 ผลของสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง

5.4.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง

5.4.2 ระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบคือ CV และ EV ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง

5.4.3 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยาง

5.4.4 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยางต่ำกว่าระบบ CV

5.4.5 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change) ของยาง

5.4.6 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change) ของยางต่ำกว่าระบบ CV

#### 5.5 ผลของสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยาง

5.5.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง

5.5.2 ระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบคือ CV และ EV ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของยาง

5.5.3 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยาง

5.5.4 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength Change) ของยางต่ำกว่าระบบ EV

5.5.5 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change) ของยาง

5.5.6 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนทานต่อการยืดขาด (Elongation Change) ของยางต่ำกว่าระบบ EV

5.5.7 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) ของยาง

5.5.8 ระบบการวัลคาไนซ์แบบ CV จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change) ของยางต่ำกว่าระบบ EV

## 5.6 ผลของสมบัติการบิดรูปที่เกิดจากการกดของยาง

5.6.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC มากขึ้นจะทำให้ค่าการบิดรูปจากการกดของยางเพิ่มมากขึ้นด้วย

5.6.2 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าการบิดรูปจากการกดของยาง

5.6.3 ระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบคือ CV และ EV ไม่ได้ส่งผลต่อค่าการบิดรูปจากการกดของยาง

## 5.7 ผลของสมบัติความทนทานต่อโอโซน

5.7.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นจะทำให้ยางมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวน้อยลง

5.7.2 ระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบคือ CV และ EV จะทำให้ยางมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวน้อยลงที่ใกล้เคียงกัน

## 5.8 ผลของสมบัติการกระจายตัวของเขม่าดำ

5.8.1 การเพิ่มอัตราส่วนการผสมยาง NBR/PVC และ NBR มากขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายตัวของเขม่าดำ

5.8.2 ระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 2 แบบคือ CV และ EV ไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายตัวของเขม่าดำ

## 5.9 ผลของการทดลองอบเป็นผลิตภัณฑ์

5.9.1 การนำยาง HNBR ผสมกับ NBR ที่อัตราส่วน 90/10 โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ผลทดสอบที่ได้จะผ่านมาตรฐานของลูกค้ำทั้งหมด และค่าทดสอบที่ได้มีแนวโน้มจะอยู่ค่ากลางตามมาตรฐานของลูกค้ำ

## 5.10 ผลของการศึกษาต้นทุนราคายางคอมเปาว์ด

5.10.1 การเพิ่มอัตราส่วนผสมของยาง NBR/PVC และ NBR จะทำให้ราคาของยางคอมเปาว์ดถูกลง

5.10.2 ราคายางคอมเปาว์ดที่มีอัตราส่วนผสมของ NBR จะมีราคาถูกลงกว่ายางคอมเปาว์ดที่มีการผสม NBR/PVC

## 5.11 ข้อเสนอแนะ

5.11.1 ควรมีการขยายการตลาดออกไปผสมกับยางชนิดอื่นๆ

5.11.2 ควรมีการปรับปรุงสูตรยางให้มีคุณสมบัติดีขึ้น

5.11.3 เพิ่มหัวข้อการทดสอบการทนทานต่อน้ำมัน E-20



## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

พงษ์ธร แซ่ฮุย 2548. ยาง : ชนิด สมบัติและการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็ม เทค), ซีอีดียูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

พงษ์ธร แซ่ฮุย & ชาคกริต สิริสิงห 2550. ยาง : กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ซีอีดียูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

พรพรรณ นิธิอุทัย 2540. ยาง : เทคนิคการออกสูตรยาง, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ปัตตานี

### ภาษาอังกฤษ

Brydson, J.A. 1988. Rubbery Materials and Their Compounds, Elsevier Applied Science, London and New York.

Ica, M.Z., Zehev, T. 1994. Mixing and Compounding of Polymers, Hanser, New York.

Frederick, R.E. 1978. Science and Technology of Rubber, Academic Press,inc., London.

Peter, A.C. & Norman, H. 1999. The Rubber Formulary, Noyes Publications, Norwich, New York, U.S.A.

Abi, S.A., Kuruvilla, J., Thomas, M., Volker, A. & Sabu, T. 2003. "Studies on accelerated sulphur vulcanization of natural rubber using 1-phenyl-2, 4-dithiobiuret/tertiary butyl benzothiazole sulphenamide." European Polymer Journal, vol. 39, pp. 1451-1460.

Enver, D., Fatma, K., Mithat, K. & Vasyk, K. 2007. "Investigation of the physical and rheological properties of SBR-1712 rubber compounds by neural network approaches." Materials & Design, vol. 28, pp. 1737-1741.

Enver, D., Fatma, K. & Mithat, K. 2007. "The effect of furnace carbon blacks on the mechanical and the rheological properties of SBR1502 styrene butadiene rubber." Materials and Design, vol. 28, pp. 1326-1329.

- Findik, F., Yilmaz, R. & Koksai, T. 2004. "Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers." *Material & Design*, vol. 25, pp. 269-276.
- Kandemirli, F., Demirhan, E. & Kandemirli, M. 2002. "Behavior of furnace black types in cis polybutadiene rubber (CBR) compounds and changes in the rheological properties of SBR-1502/CBR-1203 types of rubber compounds." *Polymer Testing*, vol. 21, pp. 367-371.
- Lynn, C.Y. 1989. "Effect of crosslink type on the fracture of natural rubber vulcanizates." *International Journal of Fracture*, vol. 39, pp. 103-110.
- Poh, B.T., Ismail, H. & Tan, K.S. 2002. "Effect of filler loading on tensile and tear properties of SMR L/ENR 25 and SMR L/SBR blends cured via a semi-efficient vulcanization system." *Polymer Testing*, vol. 21, pp. 801-806.
- Rattanasom, N., Poonsak, A. & Makmoon, T. 2005. "Effect of curing system on the mechanical properties and heat aging resistance of natural rubber/tire tread reclaimed rubber blends." *Polymer Testing*, vol. 24, pp. 728-732.
- Ru, L.F., Yong, Z., Feng, L., Yin, X.Z., Kang, S. & Yong, Z.F. 2001. "Effect of high-temperature curing on the crosslink structures and dynamic mechanical properties of gum and N330-filled natural rubber vulcanizates." *Polymer Testing*, vol. 20, pp. 925-936.

## ประวัติการศึกษา

ชื่อ	อมร อาจีนสมอาจารย์
วันเดือนปีเกิด	2 กรกฎาคม 2523
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยียาง) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต ปัตตานี
ตำแหน่ง	วิศวกรแผนกวิจัยและพัฒนา
ประสบการณ์ทำงาน	บริษัท ไอ อาร์ ซี (เอเชีย) รีเสิร์ช จำกัด