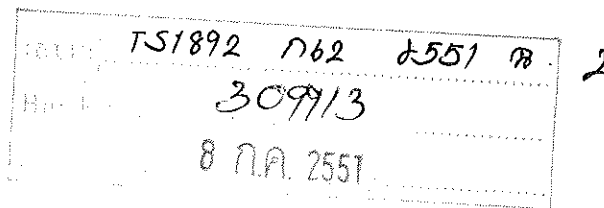


ผลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อสมบัติทางกายภาพ  
และสมบัติทางเชิงกลของยางธรรมชาติ  
**Effect of Potassium permanganate on Physical and Mechanical  
Properties of Natural Rubber**

กิจวัตร แก้วแจ่มแจ้ง  
**Kitchawat Keawjamjang**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology  
Prince of Songkla University**

**2551**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์





**Thesis Title**            Effect of Potassium permanganate on Physical and Mechanical  
                                         Properties of Natural Rubber

**Author**                    Mr.Kitchawat Keawjamjang

**Major Program**        Polymer Science and Technology

**Academic Year**        2007

### **ABSTRACT**

Oxidized natural rubber (ONR) was prepared from reaction between concentrated latex and various amount of potassium permanganate ( $\text{KMnO}_4$ ) (0 – 1.66 g/100 g dry rubber). ONR was characterized by using FT-IR technique. Hydroxyl (OH) and carbonyl (C=O) groups appeared on ONR spectrum at 3430 and 1720  $\text{cm}^{-1}$  respectively. Viscosity average molecular weight was decreased with increasing  $\text{KMnO}_4$  content. Addition of various  $\text{KMnO}_4$  content show no significant effect on tensile properties of ONR. Blend of natural rubber (NR) and ONR-2.63R was prepared for various ratios (100/0 – 20/80% by weight) by using a two-roll mill and vulcanized in a compression mold at 150°C and pressure 2500 psi. Mechanical properties such as tensile properties, aging resistance and oil resistance were determined according to ASTM. Scorch time and cure time were decreased with increasing ONR-2.63R content. Tensile properties and oil resistance were increased with increasing ONR-2.63R content in the range of 0 – 20 phr for tensile strength and 0 – 40 phr for elongation at break. Natural rubber blended with epoxidized natural rubber (60/40% by weight) was prepared by using a two-roll mill and vulcanized in a compression mold at 150°C and pressure 2500 psi. ONR-2.63R (0 – 30 phr) was used as a compatibilizer for blends. By increasing ONR-2.63R content, scorch time and cure time were decreased but tensile properties and oil resistance were increased.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงลงได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์วัชรพันธ์ พัฒนโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมเป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาแนะนำแนวทางในการทำวิจัยและคอยให้คำปรึกษาที่ดีโดยตลอดมา ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.อังคณา ปฐมสกุล ผศ.ดร.ชลดา เลวิส ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.วัชนิดา ชินผา และ ดร.สอาด ริยะจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ดร.พลพัฒน์ รวมเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ซึ่งให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล ที่เอื้อเฟื้ออย่างธรรมชาติอิฟอกชิโดซ์ ที่ใช้ในการทำวิจัยเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อและให้คำแนะนำในการทดสอบอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการทำวิจัยเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้ทั้งกำลังใจที่ดีและกำลังทรัพย์สนับสนุนการศึกษา และคอยเป็นที่ปรึกษาปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณญาติๆ ทุกคนและเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา และขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ตั้งแต่เริ่มเรียนจนถึงปัจจุบันนี้

กิจวัตร แก้วแจ่มแจ้ง

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการรูป	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(14)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.2 ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR)	10
2.3 การปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติ	11
2.4 สารเคมีสำหรับยาง	18
2.5 การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ	21
2.6 สมบัติของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	22
2.7 ยางผสม (rubber blend)	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
3. สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	35
3.1 สารเคมี	35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	36
3.3 วิธีการทดลอง	38
3.3.1 การเตรียมและการศึกษาสมบัติของยางดัดแปร	38
3.3.1.1 การเตรียมยางดัดแปร	38
3.3.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของยางดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR	41
3.3.1.3 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืดของยางดัดแปร	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1.4 การศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางดัดแปร	43
3.3.1.5 การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางดัดแปร	43
3.3.1.6 การกำหนดสัญลักษณ์ของยางดัดแปร	44
3.3.2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยาง NR กับ ONR	45
3.3.2.1 การเตรียมยางผสมระหว่างยาง NR กับ ONR	45
3.3.2.2 การศึกษาสมบัติของยางผสม (NR/ONR blend)	46
3.3.3 การประยุกต์ใช้งานยางดัดแปรในรูปแบบของสารช่วยผสม (compatibilizer)	46
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	47
4.1 การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติของยางดัดแปร	47
4.1.1 การเตรียมยางดัดแปร	47
4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของยางดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR	48
4.1.3 การศึกษาปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา	55
4.1.4 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืดของยางดัดแปร	56
4.1.5 การศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางดัดแปร	58
4.1.6 การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางดัดแปร	59
4.2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง ONR	61
4.2.1 การทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร ONR-2.63R	61
4.2.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร ONR-2.63R	63
4.2.3 การทดสอบการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร ONR-2.63R	68
4.3 การนำยาง ONR-2.63R ไปใช้ในรูปแบบของสารช่วยผสมในการผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR-50)	71
4.3.1 ผลการผสมยาง NR กับ ENR-50 ในสัดส่วนแตกต่างกันโดยปราศจากการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม	71
4.3.1.1 ผลการทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์	71
4.3.1.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยาง NR กับ ENR-50	72

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การประยุกต์ใช้งานยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม ระหว่างยาง NR กับ ENR-50	75
4.3.2.1 การทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์	75
4.3.2.2 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง ยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม	76
4.3.2.3 ผลการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยาง ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม	81
5. สรุปผลการทดลอง	85
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก	94
ก. ผลการวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ ) ของยางธรรมชาติ	95
ข. ผลการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันพีช	97
ประวัติผู้เขียน	98



## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด และยางแห้ง	6
2.2 สารที่ไม่ใช่ยางส่งผลต่อลักษณะ ปฏิกริยาและสมบัติของยาง	7
2.3 รีเอเจนต์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์อัลคีนและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น	14
2.4 ปริมาณซัลเฟอร์และสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ	22
3.1 สมบัติของน้ำยางชั้นที่ใช้ในการทำการทดลอง	35
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกริยาออกซิเดชันของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง	39
3.3 สูตรยางคอมปาวด์ของยางผสมระหว่าง NR/ONR	45
4.1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างยางธรรมชาติกับ $\text{KMnO}_4$	48
4.2 ตำแหน่งเลขคลื่นแสดงหมู่ฟังก์ชันต่างๆของยาง NR, ONR-2.63R และ ONR-5.02R	49
4.3 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกริยาระหว่างน้ำยางชั้นกับ $\text{KMnO}_4$ ปริมาณแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง	55
4.4 ค่า $[\eta]$ และ $\bar{M}_v$ ของยางดัดแปร	57
4.5 การบวมตัวในน้ำกลั่นของยางดัดแปรเมื่อใช้ $\text{KMnO}_4$ ปริมาณแตกต่างกัน	58
4.6 ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางดัดแปรเมื่อใช้ปริมาณของ $\text{KMnO}_4$ แตกต่างกัน	60
4.7 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R	62
4.8 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R (ก่อนการปมเร่ง)	63
4.9 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R (หลังการปมเร่ง)	65
4.10 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R หลังผ่านการปมเร่ง	67
4.11 การบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R	68
4.12 การบวมตัวในโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R	69
4.13 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่าง NR/ENR-50	71
4.14 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง NR/ENR-50	73

## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.15 ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน	75
4.16 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน (ก่อนการปมเร่ง)	77
4.17 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน (หลังการปมเร่ง)	78
4.18 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมหลังผ่านการปมเร่ง	80
4.19 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันซีลิโคเนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน	82
4.20 ปริมาณการบวมตัวในโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน	82
5.1 หมูฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับ $\text{KMnO}_4$	85
ก.1 ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่า $\bar{M}_v$ ของยางธรรมชาติ	94
ข.1 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันพีชของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R	96
ข.2 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันพีชของยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 โดยมียาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน	96

## รายการรูป

รูป	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง 15,000	4
2.2 ปฏิบัติการเตรียมยาง ENR	10
2.3 ตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ว่องไว ( $H_a$ ) และไม่ว่องไว ( $H_v$ )	12
2.4 ลักษณะพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้างยางที่วัลคาไนซ์แล้ว (a) โมโนซัลไฟด์ (b) ไดซัลไฟด์ (c) พอลิซัลไฟด์ และ (d) ไซคลิกโมโนซัลไฟด์และไดซัลไฟด์	18
3.1 ขั้นตอนการเตรียมยางตัดแปร	40
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมพัทธ์และความหนืดจำเพาะกับความเข้มข้นของสารละลาย	42
3.3 ขั้นตอนการทดสอบรูปตัดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ die C	44
4.1 ปฏิบัติการไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation)	48
4.2 ปฏิบัติการโอเวอร์-ออกซิเดชัน (over-oxidation)	48
4.3 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างยาง NR, ONR-2.63R และ ONR-5.02R	50
4.4 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-1.32R	51
4.5 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-3.95R	51
4.6 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-6.58R	52
4.7 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-12.50R	52
4.8 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-25.00R	53
4.9 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-50.00R	53
4.10 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-83.00R	54
4.11 FT-IR สเปกตรัมของยางตัดแปร ONR-125.00R	54
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักยางตัดแปรและของเหลวหนืดกับปริมาณของ $KMnO_4$	56
4.13 ค่า $\bar{M}_v$ ของยางธรรมชาติเมื่อทำปฏิกิริยากับ $KMnO_4$ ปริมาณแตกต่างกัน	57
4.14 ปริมาณการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางตัดแปรเมื่อใช้ $KMnO_4$ ปริมาณแตกต่างกัน	59

## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.15 ความทนต่อแรงดึงของยางตัดแปรเมื่อใช้ปริมาณของ $KMnO_4$ แยกต่างกัน	60
4.16 ระยะเวลา ยืด ณ จุดขาดของยางตัดแปรเมื่อใช้ปริมาณของ $KMnO_4$ แยกต่างกัน	61
4.17 scorch time และ cure time ของยางผสม NR/ONR-2.63R	62
4.18 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง NR/ONR-2.63R ที่สัดส่วนแยกต่างกัน	65
4.19 ระยะเวลา ยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่าง NR/ONR-2.63R ที่สัดส่วนแยกต่างกัน	66
4.20 มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของสูตรยางผสมระหว่าง NR/ONR-2.63R ที่สัดส่วนแยกต่างกัน	66
4.21 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง ยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R หลังผ่านการปมเร่ง	67
4.22 การบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนของยางผสมระหว่าง NR/ONR-2.63R	69
4.23 การบวมตัวในโทลูอีนของยางผสมระหว่าง NR/ONR-2.63R	70
4.24 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการบวมตัวของยางผสมระหว่าง ยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R หลังผ่านการปมเร่ง	70
4.25 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่าง NR/ENR-50	72
4.26 ค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง NR/ENR-50	73
4.27 ค่าระยะเวลา ยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่าง NR/ENR-50	74
4.28 ค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมระหว่าง NR/ENR-50	74
4.29 scorch time และ cure time ของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแยกต่างกัน	76
4.30 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแยกต่างกัน	79
4.31 ระยะเวลา ยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแยกต่างกัน	79
4.32 มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ กับยาง ENR-50 ที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมใน สัดส่วนแยกต่างกัน	80

## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.33 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมหลังผ่านการปมเร่ง	81
4.34 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันซีลิโคนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน	83
4.35 ปริมาณการบวมตัวในโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน	83
4.36 การเปลี่ยนแปลงการบวมตัวในน้ำมันซีลิโคนและโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน	84
ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \eta_r/c$ กับ $c$ และ $\eta_{sp}/c$ กับ $c$ ของยางธรรมชาติ	94

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

cm	=	เซนติเมตร
dL/g	=	เดซิลิตรต่อกรัม
g	=	กรัม
g/mol	=	กรัมต่อโมล
h	=	ชั่วโมง
KMnO <sub>4</sub>	=	โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
mm	=	มิลลิเมตร
mm <sup>2</sup>	=	ตารางมิลลิเมตร
mm/min	=	มิลลิเมตรต่อนาที
min	=	นาที
mL	=	มิลลิลิตร
mL/g	=	มิลลิลิตรต่อกรัม
MPa	=	เมกะพาสคาล
$\bar{M}_v$	=	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด
N	=	นิวตัน
phr	=	ส่วนในร้อยส่วนของยาง (part per hundred rubber)
ppm	=	ส่วนต่อล้านส่วน (part per million)
s	=	วินาที
T <sub>g</sub>	=	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature)

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ยางธรรมชาติเป็นที่รู้จักกันมาเป็นเวลานานแล้ว เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้อย่างมากมาย เพราะมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ทนต่อแรงดึงได้ดี ทนต่อการฉีกขาดดี ทนต่อการขีดสี และมีการกระดอนตัวดี นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความยืดหยุ่นดีที่อุณหภูมิต่ำ สามารถยึดติดกับเนื้อผ้าและโลหะได้ดี ไม่นำไฟฟ้า และราคาไม่สูงมากนักเนื่องจากการผลิตภายในประเทศ ซึ่งจากสมบัติดังที่ได้กล่าวมาจึงมีการนำยางธรรมชาติไปใช้งานในหลายจุดด้าน เช่น นำไปผลิตยางรถยนต์ พื้นรองเท้า สายยาง สายพานลำเลียง ปะเก็น ถุงมือ และอื่นๆอีกมากมาย แต่อย่างไรก็ตามแม้ยางธรรมชาติจะมีข้อดีในหลายจุดด้าน แต่ยางธรรมชาติก็ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ในงานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดดและความร้อนสูง หรือในงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีข้อด้อยคือ ยางธรรมชาติจะเสื่อมสภาพได้เร็วภายใต้โอโซน แสงแดด ความร้อนสูง และจะไม่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน ก๊าซโซลีน เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางมากที่สุดในโลกคิดเป็น 1 ใน 3 ของผลผลิตทั่วโลก ผลผลิตจำนวนนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นผลผลิตที่ได้จากการจัดการในขั้นต้นน้ำเท่านั้นคือเป็นเพียงผลผลิตวัตถุดิบ ทั้งๆที่มูลค่าเพิ่มของยางธรรมชาติอยู่ที่การผลิตขั้นปลายน้ำหรือการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าประเทศไทยมีการนำยางธรรมชาติมาทำการแปรรูปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น และมีความหลากหลายขึ้น ก็อาจทำให้ประเทศไทยมีรายได้จากยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นอีกมากมาย ซึ่งในปัจจุบันยางธรรมชาติดกลายเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญมากในทางอุตสาหกรรม โดยพันธุ์ยางธรรมชาติที่มีการนำมาใช้งานมากที่สุดเป็นยางพาราพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียซิส (*Hevea Brasiliensis*) มีชื่อทางเคมีว่า cis-1,4-polyisoprene การนำยางธรรมชาติไปใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งในสภาพของยางแห้งและสภาพน้ำยาง ขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือลักษณะงานที่ต้องการ

ในงานวิจัยนี้เล็งเห็นประโยชน์และความสำคัญของยางธรรมชาติ จึงได้คิดหาวิธีที่จะสามารถนำยางธรรมชาติมาใช้งานได้อย่างหลากหลายยิ่งขึ้น โดยทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติเมื่อเกิดปฏิกิริยากับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีหมู่ฟังก์ชันใหม่เพิ่มขึ้น เช่น หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอนิล เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นใหม่นี้อาจทำให้สามารถนำยางธรรมชาติ

ไปใช้งานในรูปแบบอื่นๆ ทำให้การใช้งานของยางธรรมชาติกว้างขึ้นและยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของยางดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ )
- 1.2.2 เพื่อเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการนำยางดัดแปรไปใช้งานในรูปแบบของสารช่วยผสม (compatibilizer)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการสังเคราะห์ยางดัดแปรจากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตตามสัดส่วนที่กำหนดไว้
- 1.3.2 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางดัดแปรที่เตรียมได้ ประกอบด้วย
  - การศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค FT-IR
  - การศึกษาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ )
  - การศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่น
  - การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึง
- 1.3.3 เตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปรตามสูตรที่กำหนดไว้เพื่อศึกษาผลของยางดัดแปรต่อสมบัติของยางผสม
- 1.3.4 ทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมสูตรต่างๆ ประกอบด้วย
  - การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงก่อนและหลังการปมเร่ง
  - การศึกษาการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายก่อนและหลังการปมเร่ง
- 1.3.5 เตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยางดัดแปรเป็นสารช่วยผสมปริมาณแตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของยางดัดแปรต่อสมบัติของยางผสม
- 1.3.6 ทดสอบสมบัติของยางผสมที่มีการเติมยางดัดแปรปริมาณแตกต่างกัน ประกอบด้วย
  - การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงก่อนและหลังการปมเร่ง
  - การศึกษาการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายก่อนและหลังการปมเร่ง
- 1.3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลที่เป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีฯ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางใหม่ในการนำยางธรรมชาติไปพัฒนารูปแบบการใช้งาน ทำให้มีความหลากหลายมากขึ้น และเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ

## บทที่ 2

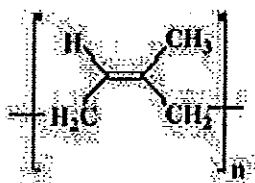
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์คอลลอยด์ที่พบในต้นไม้มากกว่า 200 ชนิด แต่น้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้มาจากการกรีดยางพาราชนิดฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea Brasillensis*) ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับต้นๆของโลกติดต่อกันหลายปี น้ำยางธรรมชาติเมื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มีความทนต่อแรงดึงที่จุดขาดสูง มีความกระดองตัวดี มีความสามารถในการติดกันสูง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติที่ไทยส่งออกนั้น จะอยู่ในรูปวัตถุดิบทำให้มีมูลค่าทางการค้าไม่สูงหรือการนำยางธรรมชาติไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆยังใช้ความรู้และการผลิตผลิตภัณฑ์ในรูปแบบเดิมๆ การคิดค้นด้านนวัตกรรมยังมีน้อย แม้ว่าการศึกษาวิจัยด้านต่างๆของน้ำยางธรรมชาติมีมานานแล้วก็ตาม (ประมวล, 2547)

##### 2.1.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า ซีส-1,4-โพลีไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) และมีโครงสร้างแบบเส้นตรงซึ่งจะประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันของหน่วยไอโซพรีน (isoprene units,  $C_5H_8$ ) (Fred, 1988) แสดงในรูปที่ 2.1 ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 500,000 มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215 ถึง 1.5238 ที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Hoffmann, 1989)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดย n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง 15,000

สำหรับโครงสร้างของยางธรรมชาติ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เป็นแบบ cis 1,4 เกือบจะสมบูรณ์ ดังนั้นชื่อทางเคมีจึงเป็น cis-1,4-polyisoprene สายโมเลกุลขนาดใหญ่ของยางธรรมชาติประกอบด้วยไอโซเมอร์ที่เหมือนกัน ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสูงมากขณะถูกยืดออก จนกระทั่งเกิดผลึกขณะการยืดได้ (crystallize on stretching) อัตราการเกิดผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของยางธรรมชาติ (Fred, 1988)

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ คือ

1) ยางธรรมชาติมีโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ประกอบด้วยหน่วย 1,4-isoprene อย่างน้อย 97 เปอร์เซ็นต์ (Roff and Scott, 1971) ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

2) พันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถันและทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง ทำให้การออกสูตรของยางจำเป็นต้องมีตัวต้านออกซิเดชัน (antioxidant) และสารต้านทานโอโซน (antiozonant) ร่วมด้วย

3) สายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน ( $T_g$ ) เท่ากับ  $-72^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอินและยางซิลิโคนเท่านั้น

4) ความสม่ำเสมอในโครงสร้าง ทำให้ยางธรรมชาติเกิดผลึกได้ เมื่อยืดออกมาก ๆ ทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง และทำให้ค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูงด้วยเช่นเดียวกัน

5) เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง ดังนั้นต้องนำยางไปบดเพื่อให้ได้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

#### 2.1.1.1 สมบัติทางเคมี

น้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยอนุภาคของยางที่เป็นไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่ไม่ใช่ยางแขวนลอยอยู่ในส่วนของเซรัม (Morton, 1987) ปริมาณของเนื้อยางแห้งในน้ำยางอยู่ระหว่าง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประกอบของน้ำยางสดแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด และยางแห้ง

ส่วนประกอบ	น้ำยาง (%)	ยางแห้ง (%)
ยางไฮโดรคาร์บอน	36.0	93.7
โปรตีน	1.4	2.2
คาร์โบไฮเดรต	1.6	0.4
ไขมัน	1.0	2.4
ไกลโคไลปิด และฟอสโฟไลปิด	0.6	1.0
ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์	0.5	0.2
สารอื่นๆ	0.4	0.1
น้ำ	58.5	-

ที่มา : Morton, 1987

ยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นโดยทั่วไป มีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนยางเป็นส่วนใหญ่และมีสารพวกที่ไม่ใช่ยาง (non - rubber substances) เป็นส่วนน้อย สารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้ถึงแม้จะมีในปริมาณน้อย แต่ก็ส่งผลกับปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางและยังมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางขั้นสุดท้ายด้วย ถึงแม้ว่าสารพวกที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้จะอยู่ในน้ำยางตั้งแต่ต้นก็ตาม แต่ปริมาณและสภาพของสารนั้นๆ จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น กรรมวิธีการผลิต ฤดูกาล สภาพดินฟ้าอากาศ และดินที่ปลูกยาง เป็นต้น (วรภกรณ์, 2523)

สารที่ได้จากการสกัดยางด้วยอะซิโตนประกอบด้วย กรดไขมัน สเตอรอล และเอสเทอร์ (fatty acid, sterols and esters) และยังมีสารอื่นๆ อีกแต่ไม่สำคัญมากนัก (Morton, 1987) กรดไขมันนี้มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยาง ส่วนสเตอรอลเป็นสารต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากสเตอรอลแล้วยังมีสารที่ละลายน้ำได้ในส่วนที่ได้จากการสกัดด้วยอะซิโตนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวต่อต้านปฏิกิริยา

สารที่ไม่ใช่ยางในแต่ละชนิดจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของยางทั้งยางดิบและยางที่วัลคาไนซ์แล้ว ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารที่ไม่ใช่ยางส่งผลต่อลักษณะ ปฏิกริยา และสมบัติของยาง

ลักษณะ ปฏิกริยา และสมบัติ	ผลของสารประเภทที่ไม่ใช่ยาง
ความเสถียรของลาเทกซ์	คาร์โบไฮเดรตเป็นอาหารของแบคทีเรียเพื่อการเจริญเติบโต และผลิตกรด ทำให้อนุภาคยางสูญเสียความเสถียร
สี	บีตา-คาโรทีน ( $\beta$ -carotene) และพอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) ทำให้มีสีเหลืองและสีน้ำตาล
ปฏิกริยาวัลคาไนซ์	ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) และโปรตีนเป็นตัวเร่งปฏิกริยา กรดไขมันเป็นตัวกระตุ้นปฏิกริยา
ปฏิกริยาออกซิเดชัน	โทโคไตรอีนอล (tocotrienol) เป็นแอนติออกซิแดนท์ (anti oxidant) โดยมีไอออนของคอปเปอร์ แมงกานีส และเหล็กเป็น โปรออกซิแดนท์
การเกิดผลึก	กรดสเตียริก (stearic acid) และสารบางชนิดที่ละลายในน้ำ มีผลทำให้ลดอัตราการเกิดผลึก
สมบัติเชิงกล	โปรตีนทำให้เพิ่มมอดูลัส ความทนต่อการฉีกขาด การสะสม ความร้อน (heat build-up) และการขยายของรอยแตก (crack growth) ถ้าอย่างวัลคาไนซ์มีปริมาณโปรตีนมาก จะทำให้ยางดู ความชื้นได้สูง ซึ่งมีผลต่อค่าครีป (creep) และการคลายความ เเค้น (stress relaxation)

ที่มา : ประมวล, 2547

นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนในผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง เช่น กุ้งมือพบว่าโปรตีน เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแพ้ในผู้ใช้อย่างไร ทำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนังหรือผู้ใช้อย่างไร อาจเกิดการแพ้อย่างรุนแรงได้ งานวิจัยหลายชิ้นในปัจจุบันจึงมุ่งกำจัดโปรตีนจากน้ำยาง เช่น ใช้การเซนติฟิวจ์ที่ความเร็วรอบสูง หรือการใช้เอนไซม์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ก็ตีพบว่าไม่สามารถกำจัดโปรตีนออกไปได้หมด (Tangboriboonrat, 1998) ยังคงมีโปรตีน บางส่วนที่ติดกับผิวของอนุภาคยางเหลืออยู่ เนื่องจากโปรตีนดังกล่าวเป็นส่วนที่ติดอยู่กับสายโซ่ ของพอลิไอโซพรีนในอนุภาคยางด้วยพันธะโควาเลนต์ ตั้งแต่ในกระบวนการสร้างน้ำยางภายใน ต้นยาง

ในด้านของผงเก่าของยางธรรมชาตินั้น โดยทั่วไปไม่มีความสำคัญ ยกเว้นเมื่อ ผงเก่านั้นๆ มีสารพวกทองแดง แมงกานีส และเหล็กเจือปนอยู่ด้วย ทั้งนี้เพราะทั้งทองแดง แมงกานีสและเหล็กต่างก็เป็นตัวเร่งปฏิกริยา (catalyst) การเกิดออกซิเดชันของยาง ชีตจำกัด

ของปริมาณธาตุแต่ละชนิดดังกล่าว คือ 8 – 10 ส่วนต่อล้านส่วน (part per million, ppm) ซึ่งโดยธรรมชาติจะมีธาตุเหล่านี้ปริมาณน้อยมากในยาง คือ มีธาตุละประมาณ 2 – 3 ppm และพบว่าส่วนของเปลือกของต้นยางมีแมงกานีสมากกว่าส่วนอื่นๆ ของลำต้น ธาตุต่างๆ ที่อาจพบ นอกเหนือไปจากที่กล่าวมาแล้ว คือ พวกโพแทสเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส แต่พวกนี้ไม่มีความสำคัญต่อคุณภาพของยางมากนัก (วรภรณ์, 2523)

### 2.1.1.2 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความหนืดของยางคอมปาวด์ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ปริมาณการกระจายตัวของสารตัวเติม ปริมาณและการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยง (Morton, 1987)

เป็นที่รู้กันว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติความแข็งแรงของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว คือยางที่วัลคาไนซ์แล้วจะมีค่าแรงดึงอยู่ในช่วง 17-24 MPa แต่เมื่อเติมเซมาต้าจะให้ค่าความทนต่อแรงดึงในช่วง 24-32 MPa ความแข็งแรงนี้สามารถบอกถึงลักษณะเฉพาะอย่างอื่น เช่น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด หรือค่าความต้านทานต่อการเกิดรอยแตก ซึ่งสมบัติทั้งสองนี้เป็นสมบัติที่ดีเยี่ยมของยางธรรมชาติ แต่ความแข็งแรงของยางธรรมชาติจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ยังคงดีกว่ายางชนิดอื่น (Morton, 1987)

### 2.1.2 น้ำยางชั้น (ประมวล, 2547)

การที่น้ำยางสดซึ่งมีปริมาณยางน้อย จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้โดยตรงในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในอุตสาหกรรม ทางปฏิบัติสามารถแปรรูปน้ำยางเป็นยางแผ่นหรือยางแท่ง โดยเติมกรดเพื่อให้อนุภาคยางจับตัวกัน และทำการล้างกรดออกด้วยน้ำ แล้วจึงรีดน้ำออกจากแผ่นยางอีกครั้ง จะได้แผ่นยางสีขาวขุ่น เมื่อผึ่งให้แห้งจะได้ยางแผ่นแห้งมีสีน้ำตาลใส ซึ่งอาจนำไปรมควันได้เป็นยางแผ่นรมควันหรืออัดเป็นยางแท่งต่อไป แต่ในกรณีที่ต้องการใช้ยางในรูปแบบคอลลอยด์ จะต้องเติมสารเคมีในน้ำยางสดเพื่อรักษาความเสถียรภาพก่อนนำมาผ่านกระบวนการทำให้น้ำยางมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น นิยมทำการผลิตน้ำยางชั้นให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ต่อน้ำหนักน้ำยางชั้นที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์

### 2.1.3 การปรับแต่งทางเคมีในน้ำยางธรรมชาติ (ประมวล, 2547)

เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยพอลิไอโซพรีนจึงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของสารพวกไดอีน (diene) ทั่วไป ซึ่งจะทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนไป ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาในพอลิเมอร์คอลลอยด์ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวนั้น จะซับซ้อนกว่าปฏิกิริยาในสารละลาย นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่ใช้กับยางธรรมชาติยังได้รับ

ผลกระทบจากส่วนที่ไม่ใช่ยางด้วย ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีที่ใช้มากในการปรับแต่งทางเคมีในน้ำยางธรรมชาติ ได้แก่

### 2.1.3.1 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (epoxidation)

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดหมู่อีพอกไซด์ (epoxide group) บนสายโซ่พอลิไอโซพรีนของอนุภาคยางธรรมชาติ โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำยางชั้นที่เสถียรด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุและกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) เช่น กรดเปอร์อะซิติก (peracetic acid) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกรดฟอร์มิก (hydrogen peroxide/formic acid) น้ำยางธรรมชาติชนิดอีพอกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) ที่เตรียมได้ ทำให้ความมีขั้วในน้ำยางเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปเตรียมเป็นฟิล์มจึงมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition,  $T_g$ ) สูงขึ้นทำให้ก๊าซผ่านได้น้อยลงและทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ได้มากขึ้น โดยสมบัติอื่นๆของยางธรรมชาติไม่เปลี่ยนแปลง เช่น มีความสามารถในการเกิดโครงสร้างผลึกเมื่อนำไปดึงยืด เป็นต้น

### 2.1.3.2 ปฏิกิริยาพรีวัลคาไนเซชัน (pre-vulcanization)

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงบางส่วนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ กลายเป็นโครงสร้างร่างแหขึ้นภายในอนุภาคของยางธรรมชาติ เมื่อทำให้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์แห้งเป็นแผ่นยาง จึงจะมีโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงเช่นเดียวกับที่พบในยางแห้งที่ผ่านการวัลคาไนซ์โดยทั่วไป ได้ยางที่มีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นสูง การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ทำได้ 3 ระบบ คือ ระบบซัลเฟอร์ ระบบเปอร์ออกไซด์ และการฉายรังสี การพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบซัลเฟอร์ เป็นระบบที่ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ ทำได้โดยการเติมสารเคมีที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ ได้แก่ ซัลเฟอร์ ซิงค์ออกไซด์ และสารตัวเร่งในลักษณะของแข็งที่กระจายอยู่ในน้ำยาง และให้ความร้อนแก่ของผสม จะทำให้เกิดพันธะซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ (S-S) เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิไอโซพรีน ความยาวพันธะ S-S มีหลายแบบขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารเคมีต่างๆที่เติมลงไปในน้ำยาง เพื่อทำให้เกิดการวัลคาไนซ์เช่นเดียวกับที่พบในการวัลคาไนซ์ยางแข็งโดยทั่วไป ส่วนการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ ส่วนใหญ่นิยมใช้เทอร์เชียรี-บิวทิว (tertiary-butyl) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) ร่วมกับน้ำตาลฟรักโทสแล้วเติมในน้ำยาง สำหรับการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์โดยการฉายรังสี ใช้รังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดโคบอลต์ 60 ( $^{60}\text{Co}$ ) ผ่านน้ำยางชั้นที่มีการเติมสารไวต่อแสง (sensitizer) ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และนอร์มอล-บิวทิวอะคริเลต (normal-butyl acrylate) ทำให้เกิดพันธะเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิไอโซพรีนแบบ คาร์บอน-คาร์บอน (C-C) เนื่องจากทั้งระบบเปอร์ออกไซด์และการฉายรังสีใช้สารเคมีจำนวนน้อยชนิดและปริมาณที่น้อยกว่าในระบบซัลเฟอร์ ดังนั้นจึงจัดได้ว่าน้ำยางพรีวัลคาไนซ์จากทั้งระบบเปอร์ออกไซด์และการฉายรังสีแกมมา มีความบริสุทธิ์สูงกว่าระบบซัลเฟอร์ แต่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงกว่า นอกจากนี้การที่มีพันธะ C-C ทำให้น้ำยางที่ได้มีความทนทานต่อการสลายตัวเนื่องจาก





## 2.3 การปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติ (Gelling and Porter, 1995)

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณค่าในทางการค้ามากกว่า 100 ปีแล้ว จึงไม่น่าแปลกใจที่ได้มีความพยายามเพื่อเปลี่ยนแปลงยางธรรมชาติเป็นวัสดุใช้งานอื่นๆ โดยเฉพาะในช่วงสภาวะที่อยู่ภายใต้แรงกดดันเชิงธุรกิจตั้งในช่วงปี ค.ศ. 1920 – 1930 พลาสติกได้ปรากฏเป็นวัสดุชนิดใหม่จนทำลายตลาดของยางธรรมชาติลงอย่างสิ้นเชิง ทำให้บรรดาผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติต้องหาทางออกเพื่อให้ประสบความสำเร็จ โดยสามารถนำยางธรรมชาติกลับมาในตลาดการค้าได้อีกครั้งในรูปของเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตเรซิน (thermoset resin) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปอนุพันธ์ของยางธรรมชาติที่สำคัญ เช่น ยางคลอรีเนตเตด (chlorinated rubber) ยางไซโคลซ์ (cyclized rubber) ยางไฮโดรคลอรีเนตเตด (hydrochlorinated rubber) และยางออกซิไดซ์ (oxidized rubber) เป็นต้น อนุพันธ์ของยางธรรมชาติบางชนิดยังมีการใช้อยู่จนกระทั่งทุกวันนี้ ยางซึ่งได้รับการปรับปรุงโครงสร้างเหล่านี้เป็นผลมาจากการทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสายโซ่ของยางธรรมชาติ โดยใช้รีเอเจนต์ที่เหมาะสม แต่พื้นฐานทางเคมีเกี่ยวกับการประยุกต์ยางธรรมชาติในขณะนั้นยังไม่เป็นที่ประจักษ์ไม่ว่าจะเป็นความเข้าใจในโครงสร้างของยางธรรมชาติ เข้าใจถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นหรือแม้แต่วิธีการที่จะเพิ่มหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เข้าไปในสายโซ่ของยางธรรมชาติ ยางซึ่งได้รับการปรับปรุงแล้วจะมีสมบัติบางอย่างแตกต่างไปจากเดิมขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ใส่เข้าไปจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบเชิงเคมีและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ พบว่าหน่วยย่อยไอโซพรีนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปหากเป็นการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูงๆ ก็จะทำให้อนุพันธ์ของยางมีสมบัติเปลี่ยนไปมากด้วยเช่นกัน จากเหตุผลนี้ทำให้ยางธรรมชาติซึ่งได้รับการปรับปรุงโครงสร้างเป็นที่สนใจในตลาดการค้ามากขึ้น

การปรากฏตลอดจนการพัฒนาของพลาสติกและยางสังเคราะห์ ในช่วงระหว่างก่อนและหลังการเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 ทำให้มีความสนใจในการที่จะพัฒนาการปรับปรุงยางธรรมชาติในรูปของวัสดุชนิดใหม่มากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นฐานทางเคมีอินทรีย์และเคมีของโอเลฟินในช่วงเวลานั้นจัดว่าเป็นช่วงกำลังพัฒนา แนวความคิดหนึ่งที่เกิดขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับเคมีอินทรีย์ ได้แก่ แนวความคิดเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาทางโมเลกุล (molecular reaction) เช่น ปฏิกิริยาฟอร์มเมชัน (formation reaction) และปฏิกิริยาซบซีควอนท์ (subsequent reaction) โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบไอออนิกและฟรีเรดิคัล ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งกับสารจำพวกโอเลฟิน ปฏิกิริยาเหล่านี้น่าสนใจเพราะไม่มีผลของปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ซึ่งสำคัญมากเมื่อใช้รีเอเจนต์จำพวกไอออนิกและฟรีเรดิคัล ในปี ค.ศ. 1965 บรรดานักวิจัยได้ทำการ ค้นคว้าถึงแนวทางการพัฒนาที่สามารถจะทำให้ประสบความสำเร็จมากที่สุดในการที่จะประยุกต์ยางธรรมชาติ โดยจะกล่าวถึงต่อไป

### 2.3.1 ชนิดของการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

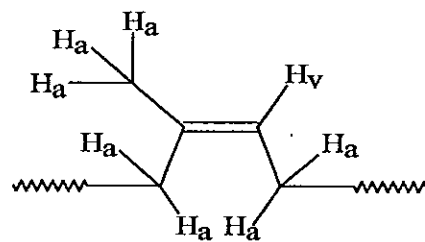
สามารถจำแนกได้ 3 ชนิด คือ

1. เปลี่ยนแปลงการจัดตัวของพันธะอย่างง่าย ๆ ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีอะตอมใหม่เข้าไปในโครงสร้างของยางธรรมชาติ เช่น การครอสลิงค์ระหว่างอะตอมคาร์บอน-คาร์บอน ปฏิกริยาไซโคลเซชัน (cyclization) ซิส - ทรานส์ไอโซเมอไรเซชัน (cis, trans-isomerization) และปฏิกริยาดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization)
2. การเติมหมู่ฟังก์ชันชนิดใหม่เข้าไปยังสายโซ่หลักของยางธรรมชาติ โดยผ่านปฏิกริยาการเติมหรือการแทนที่ตรงตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยาง
3. การกราฟท์สายโซ่พอลิเมอร์ชนิดอื่นเข้าไปยังสายโซ่หลักของยางธรรมชาติ

### 2.3.2 ปฏิกริยาทางเคมีของยางธรรมชาติ

#### 2.3.2.1 ปฏิกริยาเคมีทั่วไป

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวต่อปฏิกริยามาก การมีพันธะคู่ในทุกๆ 5 คาร์บอนอะตอมในสายโซ่โมเลกุล ทำให้สามารถเกิดปฏิกริยาการเติมหรือการแทนที่ได้กับทุกคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล ไฮโดรเจนอะตอม 7 อะตอมจาก 8 อะตอมสามารถถูกกระตุ้นได้โดยพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน มีเพียงไวเนลลิกไฮโดรเจน (vinyllic hydrogen) เพียงอะตอมเดียวซึ่งไม่ว่องไวต่อรีเอเจนต์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ว่องไว ( $H_a$ ) คือ “allylic hydrogen” และไม่ว่องไว ( $H_v$ ) คือ “vinyllic hydrogen” (Gelling and Porter, 1995)

โครงสร้างแบบพอลิไอโซพรีนของยางธรรมชาติ ทำให้มีความว่องไวมากที่สุด ในยางกลุ่มไดอีนโดยมีเหตุผลพื้นฐานสองประการที่สนับสนุนในส่วนี้ ประการแรกคือการมีหมู่อัลคิล 3 หมู่ที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ ทำให้ช่วยเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนไว้ใช้ได้เพียงพอ ตรงตำแหน่งพันธะคู่และเกิดปฏิกริยากับอิเล็กโตรฟิลิกรีเอเจนต์ได้ ประการที่สอง คือการที่มี

หมู่แอลคิล 3 หมู่จะช่วยเพิ่มความเสถียรของไอออนบวกและฟรีเรดิคัล ซึ่งทำได้โดยการดึงอะตอมไฮโดรเจนออกจากตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนอะตอมของพันธะคู่

ปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิไอโซพรีนในยางธรรมชาติสามารถแบ่งเป็นชนิดได้ดังนี้

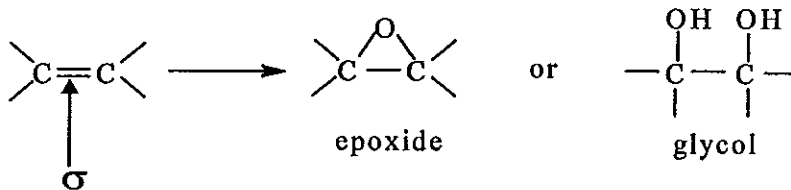
1. ปฏิกิริยาการเติมตรงตำแหน่งพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอน - คาร์บอน
2. ปฏิกิริยาการแทนที่ของอัลไลลิกไฮโดรเจนอะตอม (allylic hydrogen atom)
3. ปฏิกิริยาอิเล็กโตรไซคลิก (electrocyclic)

### 2.3.2.2 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติ

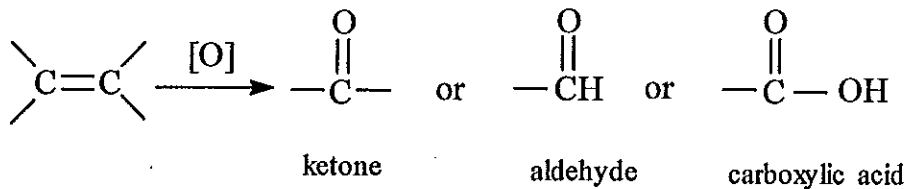
#### 1. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของอัลคีน (เกษร, 2541)

การออกซิไดซ์อัลคีนได้ผลิตผลมากมายหลายชนิด ขึ้นอยู่กับตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ โดยปฏิกิริยาจะเกิดตรงพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งอาจเกิดได้ 2 แบบ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพันธะ  $\pi$  โดยพันธะ  $\sigma$  ไม่แตกออก ได้ผลิตผลเป็นไกลคอล (glycol) หรืออีพอกไซด์ (epoxide)



2. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพันธะ  $\pi$  และพันธะ  $\sigma$  แตกออกด้วย ได้ผลิตผลเป็น คีโตน แอลดีไฮด์ หรือกรดคาร์บอกซิลิก



รีเอเจนต์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์อัลคีนมีมากมายหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชนิดก็อาจให้ผลิตผลที่เหมือนกันหรือแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 2.3

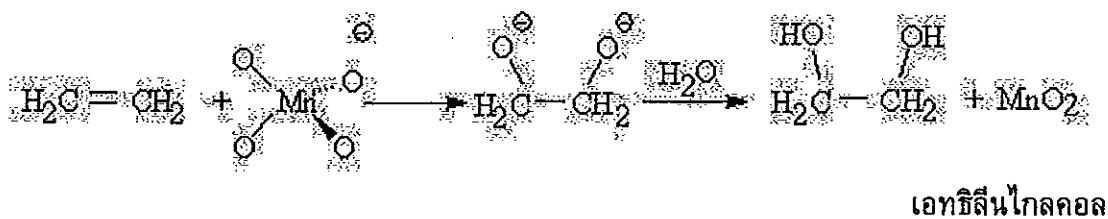
ตารางที่ 2.3 รีเอเจนต์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์อัลคีนและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

รีเอเจนต์	ผลิตภัณฑ์
การออกซิไดซ์โดยพันธะ $\sigma$ ไม่แตกออก - $\text{KMnO}_4$ และ $\text{OH}^-$ (เย็น) - $\text{OsO}_4$ แล้วตามด้วย $\text{Na}_2\text{SO}_3$ - $\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_3\text{H}$	ไกลคอล ไกลคอล อีพอกไซด์
การออกซิไดซ์โดยพันธะ $\sigma$ แตกออก - $\text{KMnO}_4$ (ร้อน) และ $\text{H}^+$ - $\text{O}_3$ แล้วตามด้วย $\text{H}_2\text{O}_2$ กับ $\text{H}^+$ - $\text{O}_3$ แล้วตามด้วย $\text{Zn}$ กับ $\text{H}^+$	กรดคาร์บอกซิลิกและคีโตน กรดคาร์บอกซิลิกและคีโตน แอลดีไฮด์และคีโตน

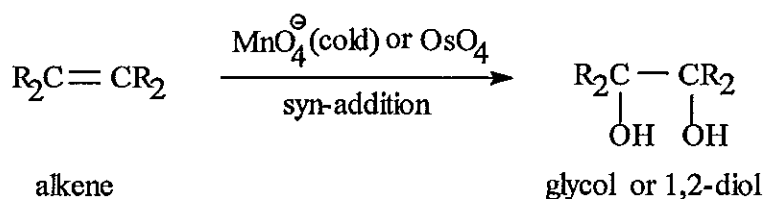
ที่มา : เกษร, 2541

## 2. การเกิดไกลคอล (เกษร, 2541)

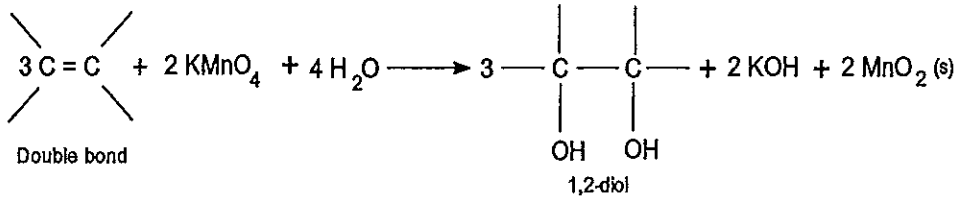
รีเอเจนต์ที่นิยมใช้มากที่สุดใน การเปลี่ยนอัลคีนให้เป็นไกลคอล คือ สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในเบสที่อุณหภูมิห้องแต่จะได้ผลผลิตต่ำ รีเอเจนต์อีกชนิด คือ ออสเมียมเตตระออกไซด์ ( $\text{OsO}_4$ ) ซึ่งจะได้ผลผลิตที่สูงกว่าแต่มีราคาแพงและมีความเป็นพิษ กลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะใช้เปอร์แมงกาเนต หรือ ออสเมียมเตตระออกไซด์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะเกิดโดยผ่านเอสเทอร์ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นซิส-ไกลคอล (cis-glycol) ดังนี้



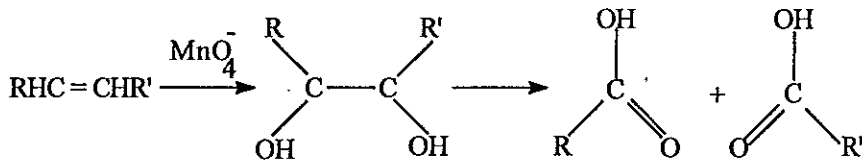
สามารถเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังนี้



### 3. การออกซิไดซ์ด้วย $\text{KMnO}_4$ (Mercangoz, 2003)



"hydroxylation"

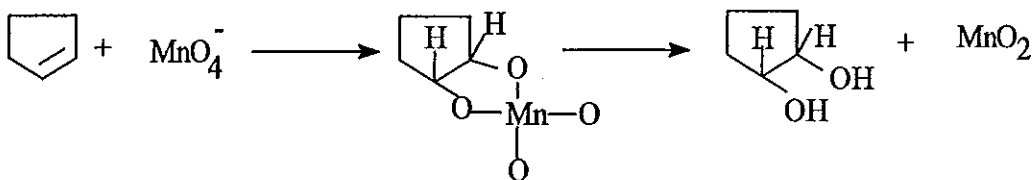


"Over-oxidation"

อัลดีนทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลเน้เจือจางของเปอร์แมงกาเนตที่อุณหภูมิห้อง ให้ผลผลิตเป็นไดแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารประกอบ 1, 2-diol หรือ ไกลคอล (glycol) เปอร์แมงกาเนตสีม่วงถูกรีดิวซ์ไปเป็นแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ซึ่งตกตะกอนเป็นสีน้ำตาลปฏิกิริยาแบบนี้เป็นปฏิกิริยาแบบไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) แต่ถ้าปฏิกิริยามีการตัดสายโซ่ของพันธะคู่  $\text{C}=\text{C}$  ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารจำพวกคาร์บอนิลปฏิกิริยาจะเป็นแบบโอเวอร์ออกซิเดชัน (over-oxidation)

กลไกของปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับการนำเอาหมู่ไฮดรอกซิลเข้าไปเกาะกับพันธะคู่ทางด้านเดียวกัน จึงเป็นปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันแบบซิส ผลผลิตที่เกิดขึ้นจึงเป็นซิส-ไกลคอล

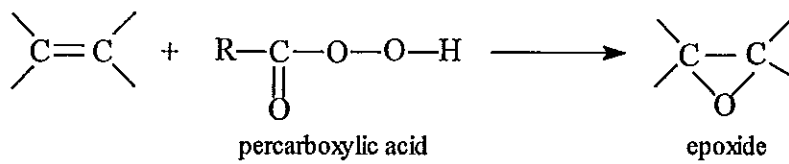
(สมพงษ์, 2535) ดังนี้



ถ้าปฏิกิริยาของอัลดีนกับเปอร์แมงกาเนตอยู่ในภาวะความเป็นกรด พันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอนจะสลาย

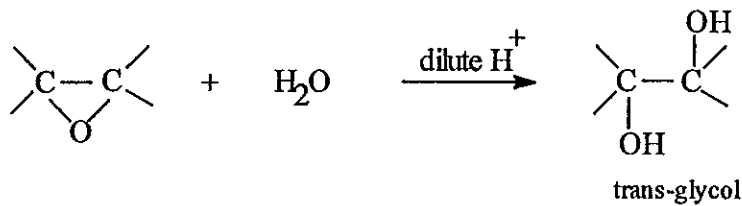
แม้ว่าปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันของอัลคีนจะให้ผลผลิตเป็นซิส-ไกลคอลก็ตามแต่  
ทรานส์-ไกลคอลก็สามารถเกิดได้ โดยการเกิดผ่านปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่หนึ่ง



ขั้นที่สอง

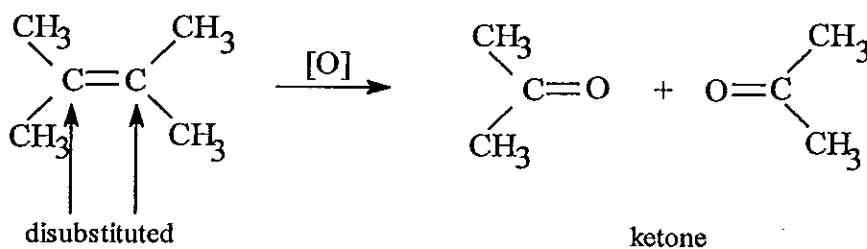
วงแหวนอีพอกไซด์จะเปิดออกเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดเจือจาง ให้  
ผลผลิตเป็นทรานส์-ไกลคอล



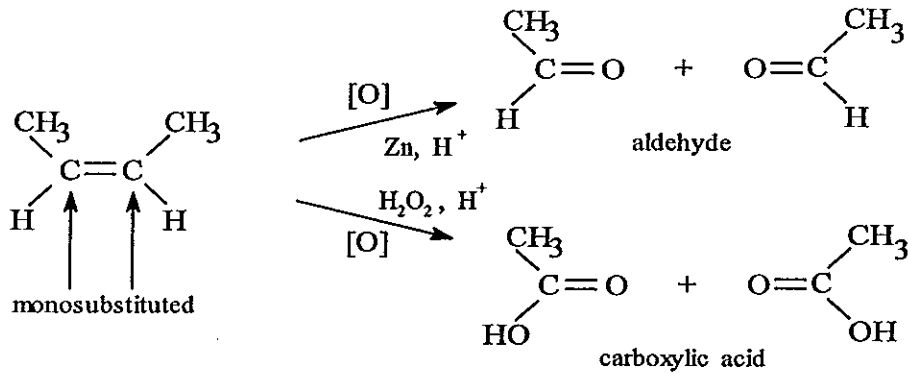
#### 4. การออกซิไดซ์โดยพันธะซิกมา (σ) แตกออก (เกษร, 2541)

การออกซิไดซ์โดยพันธะ σ แตกออกด้วยจะได้ผลผลิตเป็นอะไรนั้น นอกจาก  
ขึ้นกับสถานะของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้แล้ว ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างของอัลคีนอีกด้วย

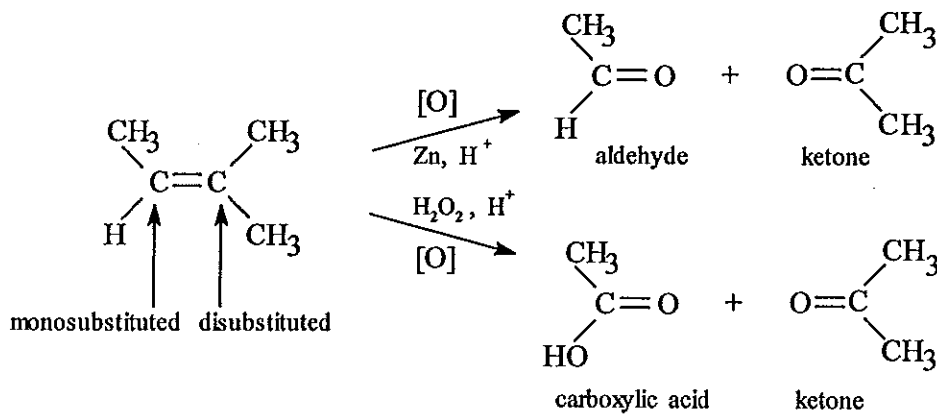
ถ้าคาร์บอนที่สร้างพันธะคู่ไม่มีพันธะกับอะตอมของไฮโดรเจน แต่เกิดพันธะ  
กับหมู่อัลคิลเหมือนกันทั้งสองด้าน การออกซิไดซ์อัลคีนชนิดนี้ได้ผลผลิตเป็นคีโตน เช่น



ถ้าคู่คาร์บอนที่สร้างพันธะคู่เกิดพันธะกับหมู่อัลคิล 1 หมู่อีกพันธะหนึ่งเกิดกับอะตอมไฮโดรเจนเหมือนกันทั้งสองด้าน ผลผลิตที่ได้อาจเป็นแอลดีไฮด์หรือกรดคาร์บอกซิลิกขึ้นอยู่กับสถานะของปฏิกิริยาดังนี้



แต่หากด้านหนึ่งของคู่คาร์บอนที่สร้างพันธะคู่เกิดพันธะกับหมู่อัลคิลทั้งหมด แต่อีกด้านเกิดพันธะกับ 1 หมู่อัลคิลและ 1 ไฮโดรเจนอะตอม ผลผลิตจากการออกซิไดซ์จะขึ้นกับสถานะของปฏิกิริยาดังนี้

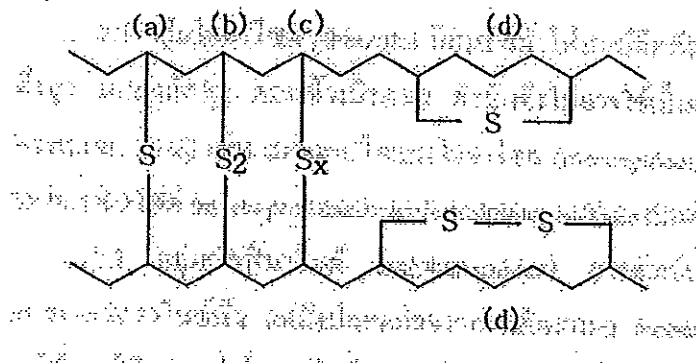


## 2.4 สารเคมีสำหรับยาง

ยางที่ผสมสารเคมีแล้วเรียกว่ายางคอมปาวด์ (compounded rubber) ในยางคอมปาวด์สูตรหนึ่งๆจะมีสารเคมีอยู่หลายตัวด้วยกัน ซึ่งอาจจำแนกได้ดังนี้

### 2.4.1 สารวัลคาไนซ์

การวัลคาไนซ์เป็นการก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง โดยสารที่นิยมใช้เป็นสารวัลคาไนซ์คือกำมะถัน ซึ่งเริ่มใช้โดย Charles Goodyear ในปี ค.ศ.1839 (Collin, 1986) เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปยางแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็งตัว ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) กำมะถันที่เป็นพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลอาจจะเป็นพันธะแบบโมโนซัลไฟด์ ไดซัลไฟด์ หรือ พอลิซัลไฟด์ แสดงในรูปที่ 2.4 (a) ถึง (c) ตามลำดับ หรืออาจจะเกิดเป็นไซคลิกโมโนซัลไฟด์และไซคลิกไดซัลไฟด์ แสดงในรูปที่ 2.4 (d) (Blow, 1975)



รูปที่ 2.4 ลักษณะพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้างยางวัลคาไนซ์แล้ว (a) โมโนซัลไฟด์ (b) ไดซัลไฟด์ (c) พอลิซัลไฟด์ และ (d) ไซคลิกโมโนซัลไฟด์และไดซัลไฟด์ (Blow, 1975)

การเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในยาง จะทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน หรือแข็งตัวเมื่อเย็นจึงเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้ยาก เนื่องจากยางจะดูดซึมตัวทำละลายเข้าไปในตัวยางจึงมีลักษณะบวมพองเท่านั้น



#### 2.4.2 สารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (accelerator)

สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์มีประโยชน์ในการใช้กว้างมาก จำเป็นต้องเลือกใช้แต่ ละชนิดและปริมาณที่เหมาะสม วิธีการเลือกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังต่อไปนี้ (กฤษฎณา, 2526)

1. กระบวนการแปรรูปที่นำมาใช้ในการผลิต
2. อุณหภูมิของกระบวนการผลิต
3. รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต
4. สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
5. สมบัติของยางที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

การจัดชนิดของสารตัวเร่งปฏิกิริยา จัดตามความเร็วของปฏิกิริยาและโครงสร้าง ทางเคมี แบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาช้า (slow accelerator) ได้แก่ กลุ่มกัวนิติน (guanidine) มีสมบัติทำให้ค่าโมดูลัสสูง แต่สมบัติหลังจากการปมเร่ง (aging) ไม่ดี แบ่งออกเป็น
  - ไดฟีนิวกัวนิติน (diphenyl guanidine, DPG)
  - ได-ออกตะ-โทลิว กัวนิติน (di-O-tolyl guanidine, DOTG)
2. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาเร็วปานกลาง (medium fast accelerator) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

- กลุ่มไธอาโซล (thiazole) มีสมบัติทำให้สมบัติหลังจากการปมเร่งดี มีความต้านทานแรงดึงสูง ค่ามอดูลัสสูง ค่อนข้างมีรสขม ดังนั้นจึงไม่อาจใช้เป็นตัวเร่งในยางที่ ต้องสัมผัสกับอาหาร (พชรพรณ, 2528) เช่น เมอแคปโทเบนโซไธอาโซล (mercaptobenzthiazole, MBT), เมอแคปโทเบนโซไธอาโซล ซัลไฟต์ (mercaptobenzthiazole sulphite, MBTS) เป็นต้น

- กลุ่มซัลฟิनाไมด์ (sulphenamides) สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ไม่ เพียงแต่ทำให้อัตราการเกิดวัลคาไนซ์เร็ว แต่ยังปลอดภัยจากการเกิดสกอช (scorch) ด้วย เป็น สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากได้แก่ นอร์มอล-ไซโคลเฮกซิล เบนโซเอซิล ซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl benzthiazyl sulphenamide, CBS)

3. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาเร็ว (fast accelerator) แบ่งออกได้ 2 กลุ่ม

- กลุ่มไธยูเรมซัลไฟด์ (thiuram sulphide) มีสมบัติคือ เกิดการวัลคา ไนซ์เร็ว มีความทนต่อความร้อนดีมาก ได้แก่ เตตระเมทริว ไธยูเรมไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) สารตัวเร่งปฏิกิริยาตัวนี้มีสมบัติพิเศษคือ ทำหน้าที่เป็นสารให้ กำมะถัน (sulfur donor)

- กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate) มีสมบัติคือ ทำให้อัตราการเกิดวัลคาไนซ์เร็วขึ้น นิยมใช้วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำหรือที่อุณหภูมิห้อง ละลายน้ำได้จึงนิยมใช้กับน้ำยาง ได้แก่ ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDC)

4. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาเร็วมาก (ultra fast accelerator) ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์เร็วมาก ได้แก่ ซิงค์ไอโซโพรพิล แซนเทส (zinc isopropyl xanthate, ZIX) มีสมบัติพิเศษคือเกิดการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้อง แต่ราคาค่อนข้างแพง

#### 2.4.3 สารตัวกระตุ้น (activator) (พรพรรณ, 2528)

สารตัวกระตุ้น คือ สารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. สารอินทรีย์ สารกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือ พวกรดไขมัน (fatty acid) เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) กรดปาล์มิติก (palmitic acid) กรดลอริก (lauric acid) เกลือเอมีนกับกรดไขมันข้างต้น พอลิแอลกอฮอล์ และอะมิโนแอลกอฮอล์

2. สารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นสารกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้ คือ ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)

สารกระตุ้นมีสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีค่ามอดุลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้นก็จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น เพราะซิงค์ออกไซด์ จำเป็นในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้สมบูรณ์

#### 2.4.4 สารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer)

พลาสติกไซเซอร์ คือ สารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อช่วยในการแปรรูปยางได้ง่ายขึ้น โดยจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณที่ใช้ (พรพรรณ, 2528) เช่น

- ถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เรียกว่า สารช่วยในการผลิต (processing aid) คือ ช่วยในการแปรรูป ช่วยในการผสมสารเคมีเข้าไปในยางทำได้ง่ายขึ้น

- ถ้าใช้ในปริมาณ 5-15 phr เรียกว่า สารทำให้นิ่ม (softener) คือ ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลงทั้งในขณะยังไม่วัลคาไนซ์และวัลคาไนซ์แล้ว

- ถ้าใช้ในปริมาณเกิน 15 phr เรียกว่า สารเพิ่มเนื้อ (extender) กรณีนี้ใส่เพื่อลดต้นทุน

ตัวอย่างของพลาสติกไซเซอร์ เช่น น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) ยางสน (pine tar) ผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเอสเทอร์ เรซิน เป็นต้น (Blow, 1975)

## 2.5 การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ได้หลายระบบ ได้แก่

### 2.5.1 ระบบกำมะถันปกติ (conventional system, CV)

ระบบกำมะถันปกติเป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุด ในแต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า พอลิซัลไฟดิก (polysulfidic crosslink) การเชื่อมโยงแบบนี้ให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดี เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดและสมบัติความต้านทานต่อการล้า และมีสมบัติการต้านทานการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่สมบัติการรีเวอร์ชัน (reversion) ไม่ดี เช่น สมบัติของยางลดลงเมื่ออบสุกเกินไปหรือยางถูกออกซิไดซ์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ส่วนสมบัติความต้านทานต่อความร้อน ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของยางธรรมชาติจะด้อยกว่าระบบอื่นๆ

### 2.5.2 ระบบอีวี (efficient vulcanizing system, EV)

ระบบอีวีเป็นระบบที่ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก หรือใช้ระบบสารที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันในการเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งอะตอม เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า มอนอซัลไฟดิก (monosulfidic crosslink) หรือสองอะตอม เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า ไดซัลไฟดิก (disulfidic crosslink) สารให้กำมะถันที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ TMTD, TMTM, MBTS, MBT และ CBS เป็นต้น สมบัติของยางที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าระบบกำมะถันปกติ แต่ยางมีความต้านทานต่อการรีเวอร์ชันดี มีความทนทานต่อความร้อนดี มีความต้านทานต่อการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์ และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดี

### 2.5.3 ระบบเซมิอีวี (semi efficient vulcanizing system, semi-EV)

ระบบเซมิอีวีเป็นระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในปริมาณที่อยู่กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบปกติกับระบบอีวี ทำให้อย่างคอมปาวด์มีสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้ โดยปริมาณซัลเฟอร์และสารตัวเร่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติทั้งสามระบบ สรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณซัลเฟอร์และสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

ระบบการวัลคาไนซ์	ปริมาณซัลเฟอร์ (phr)	ปริมาณสารตัวเร่ง (phr)	อัตราส่วนของสารตัวเร่งต่อซัลเฟอร์
กำมะถันปกติ	2.0 – 3.5	1.2 – 0.4	0.1 – 0.6
เซมิอีวี	1.0 – 1.7	2.5 – 1.2	0.7 – 2.5
อีวี	0.4 – 0.8	5.0 – 2.0	2.5 – 1.3

ที่มา : Morton, 1987

## 2.6 สมบัติของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

สมบัติของยางธรรมชาติหลังจากวัลคาไนซ์แล้วจะแตกต่างจากยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ โดยสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

### 2.6.1 ความทนทานต่อแรงดึง

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอจึงสามารถเกิดผลึกได้ เมื่อถูกดึงยืดทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง แม้ไม่มีสารตัวเติมยางธรรมชาติยังคงมีความแข็งแรงสูง (ถึงประมาณ 30 MPa) ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่บาง นิ่มและแข็งแรงได้ เช่น ถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย สายยางยืด และยางรัดของ เป็นต้น

### 2.6.2 ความสามารถในการยืด

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000% หรือมากกว่า ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และตามปริมาณของพันธะเชื่อมโยง การที่มีสมบัติในการยืดได้สูงนี้ทำให้ยางธรรมชาติสามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของและลูกโป่ง เป็นต้น

### 2.6.3 ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

การมีพันธะคู่ที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการวัลคาไนซ์อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กำมะถัน เป็นจุดอ่อนที่ทำให้ออกซิเจนและโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนด้วย จึงมีการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์และสารตัวเร่งประเภทไฮดรอกซิลลงไปในยางธรรมชาติและอบในระยะเวลาอันสั้นที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป เพื่อให้ยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพดีขึ้น แต่สมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติก็ยังคงด้อยกว่ายางสังเคราะห์

#### 2.6.4 ความทนทานต่อความร้อน

สภาวะการใช้งานอย่างธรรมชาติค่อนข้างจำกัด เพราะในสภาวะที่รุนแรงจะทำให้อายุการใช้งานของยางธรรมชาติสั้นลง ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 70°C เป็นระยะเวลาสั้น โดยเฉพาะยางบาง ซึ่งมีพื้นที่ที่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศเป็นบริเวณกว้าง และยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องตั้งยึดยางในบรรยากาศที่มีโอโซนอยู่ การทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนดีขึ้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เลือกระบบและวิธีการวัลคาไนซ์ ระบบสารตัวเติม และระบบแอนติออกซิแดนซ์ หรืออาจใช้ทั้ง 3 วิธีพร้อมๆ กันได้ กล่าวคือ ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบอีวี ทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลงจะทำให้ยางสุกน้อยลง และการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม จะทำให้ยางทนต่อความร้อนได้มากขึ้น และการใช้แอนติออกซิแดนซ์ผสมกันจะทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อความร้อนได้นานขึ้น

#### 2.7 ยางผสม (rubber blend) (Tinker and Jones, 1998)

การเตรียมยางผสมเป็นการปรับปรุงหรือพัฒนาให้ได้อย่างที่มีสมบัติดีขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในงานเฉพาะด้านได้ ซึ่งในการเตรียมยางผสมนั้นจะเป็นการนำยางสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องผสมแบบเปิดหรือแบบปิด แล้วนำยางผสมที่ได้ไปวัลคาไนซ์ เพื่อให้ยางคงรูปหรือให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง ซึ่งในการเตรียมยางผสมจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของยางผสม ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมได้แก่

##### 1.) อัตราส่วนของยางแต่ละชนิดในยางผสม

สามารถควบคุมได้ง่าย โดยจะแบ่งลักษณะสัณฐานวิทยา (phase morphology) ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1) ชนิดของเฟส (phase type) จะมี 2 ชนิดคือ เฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และเฟสกระจาย (dispersion phase) กล่าวคือ ยางชนิดหนึ่งจะกระจายตัวอยู่ในยางอีกชนิดหนึ่ง โดยจะขึ้นกับอัตราส่วนของยางแต่ละชนิดที่ใช้

1.2) ขนาดของเฟส (phase size) จะควบคุมได้ค่อนข้างยากขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมยางผสม โดยในการผสมจะใช้แรงเฉือนสูงเพื่อให้ได้เฟสกระจายที่มีขนาดเล็ก แต่ในบางชนิดสายโซ่จะขาดในระหว่างที่ทำการผสม ซึ่งจะทำให้ผสมได้ง่ายขึ้น (แต่เมื่อผสมนานขึ้นเฟสกระจายจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการกำหนดเวลาในการผสม เพราะในขณะที่ทำการผสมอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น

## 2.) แรงตึงผิวระหว่างเฟส (Interfacial tension)

เป็นแรงที่เป็นตัวกำหนดขนาดของเฟสกระจาย กล่าวคือ ถ้าแรงตึงผิวระหว่างเฟสมีค่าต่ำเฟสกระจายก็จะมีขนาดเล็กซึ่งขึ้นอยู่กับแรงเฉือนที่ใช้ ยางบางชนิด เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) และยางบิวตะไดอิน (BR) เป็นยางที่ไม่มีขั้ว มีค่าคงที่การละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกันและมีค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสต่ำ ถ้าค่าคงที่ของการละลายของยาง 2 ชนิดมีค่าแตกต่างกันมากจะมีค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสสูง และเฟสกระจายมีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถผสมยางทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกันได้

การยึดติดระหว่างเฟส (interfacial adhesion) และการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวระหว่างเฟส ถ้าค่าแรงตึงผิวมีค่าสูงจะทำให้การผสมยางทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันได้ยาก และโอกาสที่จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางทั้งสองชนิดก็จะน้อยลง ทำให้ยางทั้งสองชนิดหลุดหรือแยกจากกันได้ง่าย

## 3.) การกระจายตัวของสารตัวเติม

สารตัวเติมจะกระจายตัวอยู่ระหว่างทั้งสองเฟสอย่างสม่ำเสมอ สารตัวเติมที่นิยมใช้ทั่วไป เช่น เขม่าดำ จะเตรียมอยู่ในรูปของมาสเตอร์แบทช์ซึ่งจะควบคุมปริมาณของเขม่าดำได้ง่าย โดยปกติยางจะทำปฏิกิริยากับผิวของเขม่าดำได้ดีมาก แต่ในยางผสมบางชนิดเขม่าดำจะกระจายได้ค่อนข้างยาก

## 4.) การกระจายตัวของพลาสติกไซเซอร์

การกระจายตัวของพลาสติกไซเซอร์จะมีผลต่อสมบัติของยางผสมเช่นกัน โดยที่สารพลาสติกไซเซอร์จะกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ แต่จะกระจายตัวในเฟสต่อเนื่องมากกว่า

## 5.) การกระจายตัวของการเชื่อมโยง

ถ้าการเชื่อมโยงระหว่างเฟสในยางผสมไม่สม่ำเสมอ จะทำให้สมบัติทางกายภาพของยางผสมมีค่าต่ำ สาเหตุที่ทำให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีตำแหน่งที่จะเกิดการเชื่อมโยงแตกต่างกันมากเกินไป ดังนั้นในยางที่มีความไม่อิมมิตูสูงจึงต้องเติมซัลเฟอร์ลงไปเพื่อช่วยในการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเช่น ซัลเฟอร์ สารตัวเร่ง และสารประกอบอื่นๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์ ยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของการเชื่อมโยง (การกระจายตัวของการเชื่อมโยงสามารถนำไปศึกษาลักษณะความหนาแน่นของการเชื่อมโยงได้)

### 2.7.1 ยางธรรมชาติผสม (natural rubber blend)

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีข้อดีในหลายๆ ด้าน แต่ยางธรรมชาติยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ในงานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดดและความร้อนสูง หรือในงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีข้อด้อยคือ จะเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าโอโซน แสงแดด ความร้อนสูง และจะไม่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน ก๊าซโซลีน เป็นต้น

ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงข้อต่อของยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติเช่นเดียวกับสมบัติเด่นของยางธรรมชาติและสมบัติของยางสังเคราะห์ ทำให้สามารถนำยางผสมที่ได้ไปใช้งานได้หลากหลายขึ้น ตัวอย่างเช่น ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์นำไปใช้งานที่ต้องการความต้านทานต่อน้ำมันและมีสมบัติทางกายภาพดี หรือยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทิลีน-โพรพิลีน (EPM) นำไปใช้งานที่ต้องสัมผัสกับโอโซน ส่วนยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR) ใช้กับงานที่ต้องการให้มีสมบัติการหน่วง (damping) สูงและมีสมบัติทางกายภาพดี เป็นต้น

### 2.7.2 ความเข้ากันได้ของยางผสม (Folkes and Hope, 1993)

ความเข้ากันได้เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ดังที่กล่าวในข้างต้นว่าพอลิเมอร์ผสมแยกเป็นสองเฟสคือ เฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง โดยที่เฟสกระจายจะกระจายอยู่ในเฟสต่อเนื่อง โดยที่สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสามารถวิเคราะห์ได้จากสมบัติของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (phase morphology) ของพอลิเมอร์ผสมและค่าการยึดติดระหว่างเฟสในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมีวิธีการที่ใช้โดยทั่วไป 2 วิธี คือ การเติมพอลิเมอร์ชนิดที่สามที่เรียกว่าสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) และให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในขณะผสม จากทั้งสองวิธีนี้ทำให้โครงสร้างเฟสและสมบัติเปลี่ยนแปลงไปและทำให้ค่าการยึดติดระหว่างเฟสมีค่าสูงขึ้น วิธีการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีผู้ที่ทำการศึกษามาแล้ว มีวิธีการดังนี้

1) การเพิ่มความเข้ากันได้โดยใช้กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic miscibility)

2) การเติมบล็อกหรือกราฟโคพอลิเมอร์ โดยที่บล็อกหรือกราฟโคพอลิเมอร์มีโครงสร้างโมเลกุลบางส่วนเหมือนกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม โคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลสอดคล้องกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม จะทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น โดยโคพอลิเมอร์ที่เติมลงไปจะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก

ประสิทธิภาพของความเข้ากันได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ โดยพบว่า บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่ากราฟโคพอลิเมอร์ โดบบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ ส่วนน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์มีผลต่อการละลายได้ของโคพอลิเมอร์ในแต่ละเฟสของพอลิเมอร์ผสม และมีผลต่อความเร็วในการกระจายตัวของโคพอลิเมอร์ไปยังบริเวณระหว่างเฟสทั้งสอง ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลสูงการกระจายตัวไปยังบริเวณระหว่างเฟสต้องใช้เวลาานาน

3) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (functional polymer) โดยปรับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือมีพันธะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่คล้ายกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์อีกชนิด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

4) การเพิ่มความเข้ากันได้โดยกระบวนการ reactive blending นิยมใช้ในการผสมที่เป็นเทคนิคผสมแบบหลอม โดยในระหว่างที่ทำการผสมจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบวิธีนี้มักใช้กับการขึ้นรูปที่เป็นกระบวนการต่อเนื่อง เช่น ใช้กับเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยวหรือสองสกรู

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติ

Perera และคณะ (1987) ศึกษาการนำหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เข้าไปยังสายโซ่ของยางธรรมชาติ ทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกทำได้โดยการนำยาง epoxidized natural rubber (ENR) ทำปฏิกิริยากับ lithium aluminium hydride หรือ aluminium hydride ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเทอร์เชียรีแอลกอฮอล์ (tertiary alcohol) โดยการนำยาง ENR-30 ปริมาณ 0.75 g ละลายใน anhydrous tetrahydrofuran หลังจากนั้นเติม aluminium hydride หรือ lithium aluminium hydride ลงไป ปฏิบัติตามดำเนินไปเป็นเวลา 7 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิบรรยากาศของผสมถูกไฮโดรไลซ์ด้วย ethyl acetate และกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 10 %v/v จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้งด้วย sodium bicarbonate แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^{13}\text{C-NMR}$  ส่วนวิธีที่สองสามารถทำได้โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรโบเรชัน (hydroboration) ในยางธรรมชาติ หลังจากนั้นตามด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเซคันดารีแอลกอฮอล์ (secondary alcohol) วิธีการคือนำ boron trifluoride diethyletherate ปริมาตร 1 mL ใน anhydrous diglyme 10 mL มาเติมด้วยสารละลาย 1 g ของ sodium borohydride ใน diglyme 25 mL โดยการหยดลงไปที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  สารประกอบ diborane ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาถูกทำให้ไหลอย่างช้าๆ โดยในโตรเจนแห้งไปยังสาร anhydrous tetrahydrofuran 25 mL และสารละลายนี้ถูกหยดลงในสารละลายยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  เมื่อผ่านไป 15 min ทำให้ของผสมร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง  $40^{\circ}\text{C}$  และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 30% ปริมาตร 10 mL ตามด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% ปริมาตร 5 mL รอให้ของผสมเกิดปฏิกิริยา 1 h ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  แล้วนำมาตกตะกอนในน้ำกลั่น กรอง และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $34^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^{13}\text{C-NMR}$  ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า ทั้งสองวิธีที่ใช้ในการนำหมู่ไฮดรอกซิลเข้าไป



ในสายโซ่ของยางธรรมชาติได้ผล เพราะสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบด้วย  $^{13}\text{C-NMR}$  พบพีคที่แสดงตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมซึ่งต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลปรากฏที่ตำแหน่ง chemical shift ประมาณ 72 ppm

Ravindran และคณะ (1988) ศึกษาการสลายตัวด้วยแสงของยางธรรมชาติ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เป็นยาง hydroxyl-terminated natural rubber (HTNR) วิธีการทดลองทำได้โดยนำยางธรรมชาติมาบดเป็นเวลา 30 min ที่อุณหภูมิ  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำยางธรรมชาติที่ถูกบดแล้ว 1 kg ไปละลายในโทลูอีนปริมาตร 10 L แล้วนำสารละลายยางไปต่อกับตัวกำเนิดแสงและมีการกวนอย่างต่อเนื่อง เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาตร 500 mL ลงไป ทำของผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยการเติมเมทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 1.5 L หรือเตตระไฮโดรฟูราน ปริมาตร 2.5 L แล้วนำไปฉายด้วยแสงโดยใช้แสงสองชนิดในการทดลองคือ แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสงแดด (sunlight) เมื่อฉายแสงครบ 50 h นำยางธรรมชาติมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงอย่างมาก โดยการฉายด้วยแสง UV ทำใหยางธรรมชาติสลายตัวได้เร็วกว่า น้ำหนักโมเลกุลจึงน้อยกว่าการฉายด้วยแสงแดด เมื่อใช้เวลาในการฉายแสงเท่ากัน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR พบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $3400\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$  ค่า chemical shift เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิค  $^{13}\text{C-NMR}$  ปรากฏพีคซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของคาร์บอนซึ่งต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ chemical shift 63.51 และ 60.72 ppm ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ส่วนการทดสอบด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบพีคซึ่งเป็นสัญญาณของ allylic hydroxyl protons ที่ chemical shift เท่ากับ 5.1 ppm

Mirzan และคณะ (1993) กราฟท์ N,N-dimethyl acrylamide (DMAA) ซึ่งเป็นไฮโดรฟิลิกมอนอเมอร์เข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยใช้เทคนิคการกราฟท์ที่มีความแตกต่างกันดังต่อไปนี้คือ simultaneous, per-oxidation และ preirradiation techniques พบว่าการกราฟท์โดยเทคนิค simultaneous, per-oxidation และ preirradiation ให้ประสิทธิภาพของการกราฟท์ 29, 42 และ 13% ตามลำดับ

Nor และคณะ (2000) ศึกษากลไกการขาดของสายโซ่และการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโอโซนไลซิส (ozonolysis) ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่อุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาในการทดลองแตกต่างกันคือ 1, 5, 10, 15 และ 20 min เมื่อนำยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาโอโซนไลซิสไปทำการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC พบว่าเมื่อใช้เวลาในการโอโซนไลซิสนานขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการทดสอบด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบว่า สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ผ่านการโอโซนไลซิสเปลี่ยนแปลงไปจากสเปกตรัมเดิมของยางธรรมชาติ โดยมีพีคใหม่ปรากฏเพิ่มขึ้น 3 พีค และจะเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อยๆเมื่อใช้เวลานานขึ้น พีคใหม่ที่ปรากฏขึ้นประกอบด้วยที่เลขคลื่น  $3440\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เลข

คลื่น  $1720\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่คาร์บอนิล (C=O) และเลขคลื่น  $1084\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่ไอโซไนต์ ในทางกลับกัน พีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติมีขนาดเล็กลงเมื่อเวลาของการไอโซไนไลซิสเพิ่มขึ้น คาดว่าเนื่องมาจากปฏิกิริยานี้ทำให้สายโซ่ของยางธรรมชาติขาดตรงตำแหน่งพันธะ C=C ส่งผลให้พีคหลักมีขนาดเล็กลง แต่มีพีคที่เลขคลื่นประมาณ  $1378\text{ cm}^{-1}$  ไม่เปลี่ยนแปลงขนาด อาจเป็นไปได้ว่าการหมุนของพันธะ C-H ของหมู่ฟังก์ชัน  $\text{CH}_3$  ที่เลขคลื่นนี้เป็นแบบ asymmetric bend ซึ่งไม่มีผลต่อการไอโซไนไลซิส

Derouet และคณะ (2000) ปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของยางที่มีโครงสร้างแบบ 1,4-polydienes โดยใช้ di(alkyl หรือ aryl)phosphates ใส่เข้าไปทางหมู่ข้างของสายโซ่โมเลกุล การสังเคราะห์สามารถทำได้ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นการทำให้หมู่ฟังก์ชันของ polydienes กลายเป็นแบบ functionalized intermediate polydienes ซึ่งเตรียมได้โดยการทำให้เกิด partial epoxidation กับ 1,4-polyisoprene หรือ 1,4-polybutadiene และขั้นที่สองเป็นการเติม di(alkyl หรือ aryl)phosphates ให้เกิดปฏิกิริยากับส่วนที่ได้ในขั้นตอนแรกกลายเป็นวงแหวน oxirane

Mercangoz และคณะ (2003) ศึกษาปฏิกิริยาของพันธะคู่ C=C ของน้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil) กับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) และมีการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 และ  $50^\circ\text{C}$  และความดัน 70, 120 และ 130 bar พบว่า soybean triglyceride double bonds (STDB) มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 23.5 ถึง 32.6% เมื่อปริมาณของน้ำที่ทำการผ่านเข้าไปในปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น โดยเกิดในรูปของ 1,2-diol แต่ปฏิกิริยาที่เกิดมีปฏิกิริยา over-oxidation เกี่ยวข้องด้วยทำให้ STDB มีการสลายตัวโดยสลายตัว 8% เมื่อเวลาของปฏิกิริยาผ่านไป 1 h 30.1 และ 42% เมื่อผ่านไป 16 และ 40 h ตามลำดับ ทำให้พันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอนลดลง

Nakason และคณะ (2004) เปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยทำการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ maleic anhydride (MA) โดยมีไทลูอินเป็นตัวกลางและมี benzoyl peroxide (BPO) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา สารที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่นี้ เรียกว่า maleated natural rubber (MNR) อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่ม ปริมาณ MA ที่ถูกกราฟต์กับโมเลกุลของยางธรรมชาติหาได้โดยการไทเทรตกับกรดคาร์บอกซิลิก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มระดับการกราฟต์ของ MA และยังพบอีกว่า  $T_g$  ของ MNR มีค่าสูงกว่า  $T_g$  ของยางธรรมชาติและยังมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น

## 2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางผสมและความเข้ากันได้ของยางผสมต่าง ๆ

Mukhopadhyay (1991) ศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยตัวเอง (self-vulcanizable) ของยางผสมระหว่างยางนีโอพรีน (CR) กับยางคาร์บอกรีทไนไตรล์ (XNBR) โดยอธิบายถึงผลของอัตราส่วนของยางผสมต่อความเข้ากันได้และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางผสม ซึ่งในการทดลองจะผสมยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  จะสามารถวัลคาไนซ์ได้โดยไม่ต้องใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง FT-IR ปริมาณการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับเวลาและอัตราส่วนของยางทั้งสองชนิดในยางผสม เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMA และเครื่อง DSC พบว่า ยางทั้งสองชนิดไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับการวิเคราะห์การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ใช้เครื่อง Monsanto rheometer, เครื่อง FT-IR และทดสอบการบวมตัว ส่วนสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางผสมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของยางผสม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการวัลคาไนซ์ยางในระบบปกติ

Zanzig และคณะ (1993) ศึกษาผลของ 1,4-polyisoprene-1,4-polybutadiene (IBR) ที่ใช้เป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอีน (cis-1,4-polybutadiene, BR) ใช้เครื่อง DSC และ TEM ในการตรวจสอบระดับความเข้ากันได้ของยางทั้งสองชนิด ยางผสมจะวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และมีการเติมเขม่าดำลงในยางผสมด้วย แต่ปริมาณ IBR ที่เติมลงไปจะเติมได้ในปริมาณที่จำกัด ผลการทดลองพบว่า ความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมจะดีขึ้นเมื่อเติม IBR ในปริมาณน้อย และยังช่วยป้องกันการยืดเกาะของเขม่าดำในยางคอมปาวด์ดีขึ้นด้วย

Asaletha และคณะ (1995) พบว่ายางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (PS) ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก แต่สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ให้ดีขึ้น โดยการเติมยางธรรมชาติกราฟท์พอลิสไตรีน (NR-g-PS) เข้าไปเป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งผลของน้ำหนักโมเลกุลของโฮโมพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของโคพอลิเมอร์ สภาวะการแปรรูปและวิธีการเติมจะมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเฟสกระจาย ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง SEM การเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ลงไปปริมาณน้อยจะช่วยลดขนาดของเฟสกระจายให้เล็กลง ผลที่ได้จากการทดลองนี้นำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีของ Noolandi และ Hong การเติม NR-g-PS ลงไปทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมดีขึ้น และสมบัติเชิงกลจะสัมพันธ์กับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะที่เป็นอยู่ของ NR-g-PS ระหว่างเฟสทั้งสอง

Jansen และ Soares (1996) ศึกษาผลของอัตราส่วนของยางผสม ความเข้ากันได้ รวมทั้งขั้นตอนการวัลคาไนซ์ที่มีต่อสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) โดยใช้ EVASH (poly(ethylene-co-vinyl alcohol-co-vinylmercaptoacetate)) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และใช้ dicumylperoxide

(DCP) เป็นสารวัลคาไนซ์ พบว่า การเติม EVASH หรือ DCP ลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง EVA ทำให้ความทนต่อแรงดึงของยางผสมหลังการป้อนแรงที่ 70°C เป็นเวลา 24 h มีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการป้อนแรงนานขึ้น สมบัติเชิงกลจะมีค่าลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการสลายตัว แต่กระบวนการนี้เกิดช้าลง เมื่อเติม EVASH ลงในยางผสม และการเติม EVASH ลงในยางผสมทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง

Okwu และ Okleimen (1999) ทำการเตรียม FC-ENR (formic acid crosslinked epoxidized natural rubber) ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 33% ในสภาวะ pre-crosslinking แล้วนำไปผสมกับยางธรรมชาติ ได้ยางผสม 4 สูตร คือ FC-ENR (K), NR (L), FC-ENR/NR blend 25/75 (M), FC-ENR/NR blend 50/50 (N) ทุกสูตรเติมเคมีดำชนิด ISAF 30 phr และวัลคาไนซ์ด้วยระบบเคมีอีวี ยกเว้นสูตร FC-ENR แล้วทำการศึกษาศสมบัติทางกายภาพของแต่ละสูตร พบว่า ในระหว่างที่บดยางด้วยลูกกลิ้งการเติม FC-ENR ลงในยางธรรมชาติทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นพลาสติกมากขึ้น และการเติม FC-ENR 25 phr ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติ เช่น ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดีขึ้น ค่ามอดูลัสและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่สภาวะการเตรียมยางผสมไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ

Ismail และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม 2 ชนิด คือ ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 (ENR-25) กับยางธรรมชาติ (SMR L) และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 (ENR-50) กับยางธรรมชาติ (SMR L) ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยในยางผสมจะแปรปริมาณยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 100% และทำการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดทั้งก่อนและหลังการป้อนแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 48 h โดยเตรียมขึ้นตัวอย่างแบบรูปจันทร์เสี้ยว (die A ตามมาตรฐาน ASTM D624) และดึงขึ้นตัวอย่างด้วยความเร็วในการดึง 500 mm/min พบว่าเมื่อยาง ENR เพิ่มขึ้นค่า scorch time และ cure time จะสั้นลง แต่ค่าเทอร์คสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พันธะคู่ถูกกระตุ้นด้วยหมู่อีพอกไซด์ในยาง ENR และยังทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยยาง ENR-50 จะมีค่าที่มากกว่ายาง ENR-25 เพราะมีหมู่อีพอกไซด์มากกว่า กล่าวคือ ยางผสมระหว่างยาง ENR-25 กับยางธรรมชาติมีค่า scorch time และ cure time นานกว่ายางผสมระหว่างยาง ENR-50 กับยางธรรมชาติ และจากค่าเทอร์คและค่า loss tangent ที่ได้ทำให้ทราบว่ายางผสมจะมีสมบัติการกระดอนตัวดีเมื่อมีปริมาณยาง ENR น้อยกว่า 25% หรือมากกว่า 50% ส่วนค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อยาง ENR เพิ่มขึ้นถึง 50% เนื่องจากมีการกระจายพลังงานมากขึ้นตามปริมาณยาง ENR ซึ่งสังเกตได้จากค่า loss tangent ที่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการป้อนแรงด้วยความร้อนมีค่า

ลดลง เพราะยาง ENR มีสมบัติหลังการบ่มแรงที่ไม่ดี และยางผสมระหว่างยาง ENR-25 กับยางธรรมชาติ มีการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนน้อยกว่ายางผสมระหว่างยาง ENR-50 กับยางธรรมชาติ เพราะยาง ENR-25 มีความต้านทานต่อการบ่มแรงด้วยความร้อนดีกว่ายาง ENR-50

Okwu และคณะ (2001) ทำการปรับปรุงยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR) ด้วยกรดไซโอไกลคอลลิก (TGA) โดยเตรียมในสภาวะที่เป็นสารละลาย ได้สารที่ต้องการคือ ยาง ENR-TGA 17% ของยาง ENR เริ่มต้น แล้วนำ ENR-TGA และยางผสมระหว่างยาง ENR-TGA กับยางธรรมชาติมาเติมเขม่าดำและวัลคาไนซ์ด้วยระบบเคมีอีวี พบว่า ยาง ENR-TGA มีความทนต่อแรงดึงต่ำ แต่มีความต้านทานต่อตัวทำละลายและน้ำมันได้ดีกว่ายางธรรมชาติ ส่วนยางผสมระหว่างยาง ENR-TGA กับยางธรรมชาติที่มี ENR-TGA ปริมาณ 10 phr สามารถเพิ่มค่าโมดูลัสได้ถึง 40% และที่อัตราส่วนดังกล่าว ยางผสมมีความแข็งและความต้านทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายและน้ำมันได้ดีขึ้น แต่ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาด มีค่าต่ำลง

El-Sabbagh (2003) ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอโนเมอร์ (EPDM) โดยในการผสมยางจะใช้การฉายรังสีพลังงานสูง (รังสีแกมมา) เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างโมเลกุลของยาง และทำการผสมโดยใช้สารพวกเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอโนเมอร์กราฟท์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (EPDM-g-MAH) เป็นสารช่วยผสมให้ยางเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือใช้ยางชนิดอื่นเป็นตัวช่วยให้เข้ากันได้ เช่น ยางบิวตะไดอีน (BR) ยางคลอริเนตเตด และยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทิลีน (CSM) เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง EPDM จะใช้เครื่อง DSC และ SEM และการวัดความหนืดของยางผสม จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มสารช่วยผสม (compatibilizer) เพียงเล็กน้อย จะทำให้ยางเข้ากันได้มากขึ้นและสมบัติของยางผสมจะดีขึ้น

Sirisinha และคณะ (2004) ศึกษาผลของเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอโนเมอร์กราฟท์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (EPDM-g-MA) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารแอนติออกซิแดนซ์ประเภทฟีนอลิก (phenolic) ต่อความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานต่อการบ่มแรงด้วยความร้อนของยางผสมระหว่างยางคลอริเนตเตดพอลิเอทิลีน (CPE) กับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 50/50 พบว่า EPDM-g-MA ทำให้ขนาดของเฟสของยางผสมมีขนาดเล็กลงเพราะ EPDM-g-MA จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น โดยสามารถใช้ได้ไม่เกิน 1 phr เพราะถ้าปริมาณมากกว่านี้ขนาดของเฟสจะเริ่มใหญ่ขึ้น ส่วนการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์จะไปทำให้ขนาดของเฟสลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสารแอนติออกซิแดนซ์ทำให้เฟสของยางธรรมชาติเสถียรต่อความร้อนได้ดีขึ้น ทำให้การรวมกันของเฟสยางธรรมชาติลดลง สำหรับความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานต่อการบ่มแรงด้วยความร้อน จะสัมพันธ์กับความทน

ต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยาง CPE กับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 50/50 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟสยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ในยาง CPE โดยที่ถ้าเฟสยางธรรมชาติมีขนาดเล็กกว่า ก็จะมี ความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานการปมเร่งด้วยความร้อนสูงกว่า

Teh และคณะ (2004) ศึกษาผลของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENR) ในการเป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ organoclay โดยการผสมแบบ melt compound ในเครื่องผสมแบบปิดและใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ (conventional) ผลของยาง ENR-25 และ ENR-50 ทดสอบโดยเครื่อง Monsanto MDR พบว่าการเติมยาง ENR ลงในยาง NR ทำให้ค่า scorch time และ cure time ลดลง เนื่องจากผลของหมู่อีพ็อกไซด์ในยาง ENR ส่วนค่าทอร์คสูงสุดพบว่าเมื่อเติมยาง ENR-50 จะให้ค่าที่สูงกว่าการเติมยาง ENR-25 ในปริมาณการเติมที่เท่ากัน การกระจายตัวของ organoclay เมื่อทดสอบด้วย TEM พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีกว่าหรือมีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติมากกว่าเมื่อมีการเติมยาง ENR ส่วนสมบัติทางเชิงกลของยางคอมปาวด์เมื่อเติมยาง ENR ทำให้ยางคอมปาวด์มีสมบัติทางเชิงกลที่สูงขึ้นและเติมยาง ENR-50 ให้ผลที่สูงกว่ายาง ENR-25 ในปริมาณการใช้ที่เท่ากัน

Nakason และคณะ (2005) เตรียมยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ (ENRs) ซึ่งมีระดับของหมู่อีพ็อกไซด์ตั้งแต่ 10, 20, 30, 40 และ 50 mol% เพื่อใช้ในการเตรียม thermoplastic vulcanizates (TPVs) โดยการนำไปผสมกับ PMMA และทำการวัลคาไนซ์ด้วยกระบวนการทางไดนามิกโดยใช้กัมมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ซึ่งใส่ในขณะทำการผสม ค่าทอร์คของการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ ENR และค่า mol% ของหมู่อีพ็อกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสมนี้ โดยเฉพาะแรงดึงผิวระหว่างเฟสอีลาสโตเมอร์และเฟสเทอร์โมพลาสติก ค่าความทนต่อแรงดึงของ TPVs ซึ่งมียาง ENR-20 เป็นส่วนผสมมีค่าสูงเพราะเมื่อมีการดึงยืดจะเกิดการเหนียวทำให้เกิดผลึก ยาง ENRs ที่มีระดับของหมู่อีพ็อกไซด์มากกว่า 30 mol% ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะช่วยเพิ่มแรงกระทำทางเคมีระหว่างโมเลกุลและเฟสที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งของ TPVs เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของหมู่อีพ็อกไซด์เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อปริมาณของยาง ENRs ใน TPVs เพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของ 2 เฟส พบว่าอนุภาคของ ENR กระจายอยู่ในเฟสของ PMMA ซึ่งเป็นเมทริกซ์ จากการทดสอบด้วยเครื่อง SEM

Varaporn และคณะ (2005) ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางสังเคราะห์คลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน (CSM) ที่หลายอัตราส่วน (80/20-20/80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) เตรียมยางผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความดันที่อุณหภูมิ 150°C ศึกษาสมบัติเชิงกลและความเข้ากันได้ของยางผสม ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการปมเร่งด้วยความร้อน ความต้านทานต่อโอโซน และการบวมตัวในน้ำมัน จากการทดสอบพบว่า สมบัติ

ความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมขึ้นอยู่กับสูตรและอัตราส่วนของยางผสม ส่วนความต้านทานต่อโอโซนและความทนต่อน้ำมันของยางผสมมีสมบัติดีขึ้นเมื่อปริมาณยาง CSM เพิ่มขึ้น แต่ยางผสมมีความต้านทานต่อการฉีกขาดน้อยลง ในงานวิจัยนี้ใช้ Struktol 60 NS และยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR) (Epoxyprene 25) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) พบว่า การเติม Struktol 60 NS ลงในยางผสมทำให้ยางผสมมีสมบัติบางประการด้อยลง อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในการผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แต่การเติมยาง ENR ทำให้สมบัติดังกล่าวข้างต้นมีค่าสูงขึ้น แต่จะลดลงเมื่อยาง ENR เพิ่มขึ้น โดยปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสมเท่ากับ 1 phr จากการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของยางผสมด้วยเครื่อง (SEM) และการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA) พบว่า ยางผสมที่เตรียมได้ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเพราะมีการแยกเฟสอย่างชัดเจน ยางผสมที่มี CSM 20-50% ประกอบด้วยอนุภาคของ CSM ที่มีขนาดระหว่าง 1.55-2.45 ไมครอน การเติม Struktol 60 NS ลงในยางผสมไม่มีผลต่อสัญญาณวิทยาของยางผสม แต่การเติมยาง ENR ทำให้อนุภาคของ CSM มีขนาดเล็กและอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน ( $T_g$ ) ของยาง CSM ในยางผสมมีค่าลดลง

Pechurai และคณะ (2008) ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง oil extended natural rubber (OENR) กับ HDPE โดยกระบวนการผสมแบบหลอม (melt mixing) ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  และใช้ phenolic modified polyethylene (PhHRJ-PE) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) สมบัติที่ทำการศึกษาคือ สมบัติการไหล ความทนต่อแรงดึง ลักษณะทางสัญญาณวิทยา และความแข็ง จากการทดลองพบว่า การผสม OENR กับ HDPE โดยใช้ PhHRJ-PE เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติการไหลที่ดีกว่าไม่ใช้ PhHRJ-PE การศึกษาด้วยเครื่อง SEM พบว่าที่สัดส่วนของ OENR/HDPE เท่ากับ 50/50 และ 60/40 พอลิเมอร์ผสมแสดงพฤติกรรมเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ส่วนสมบัติความทนต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความแข็ง ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ OENR/HDPE

Poh และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาศสมบัติการยึดติดซึ่งได้แก่ ความหนืด การยึดติด (tack) และสมบัติการลอก (peel strength) ของสารยึดติดซึ่งไวต่อการกระตุ้นสูง (pressure-sensitive adhesives) โดยเตรียมได้จากการผสมระหว่างยาง NR (SMR-10) กับ ENR โดยใช้คумаโลนอินดินเรซินและโทลูอีนเป็นสารช่วยในการยึดติด (tackifier) และตัวทำละลายตาม ลำดับ ยาง SMR-10, ENR-25 และ ENR-50 ที่ใช้แปรปริมาณตั้งแต่ 0-100% คумаโลนอินดินเรซินใช้ในปริมาณคงที่เท่ากับ 40 phr ความหนืดของสารยึดติดศึกษาด้วยเครื่อง HAAKE ส่วนค่าการยึดติด และสมบัติการลอกทดสอบด้วยเครื่อง Lloyd และใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 30 cm/min จากผลการทดลองพบว่า ความหนืดของสารยึดติดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้เมื่ออัตราส่วนของยางเท่ากับ 20% ส่วนค่าการยึดติดและสมบัติการลอกมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วน

ของยาง SMR-10/ENR-25 และ SMR-10/ENR-50 เท่ากับ 60% แต่อย่างไรก็ตามยางผสม  
ระหว่าง ENR-25/ENR-50 ให้สมบัติดังกล่าวข้างต้นดีที่สุดเมื่ออัตราส่วนยางผสมเท่ากับ 80%  
และยางผสม SMR-10/ENR-25 ให้ค่าการยึดติดดีที่สุดในการศึกษานี้



### บทที่ 3

#### สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

##### 3.1 สารเคมี

1. น้ำยางข้น 60% เนื้อยางแห้ง ชนิดแอมโมเนียสูง (rubber latex 60% DRC, HA) ผลิตโดยบริษัท Chana Latex จำกัด สมบัติของน้ำยางข้นที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำยางข้นที่ใช้ในการทำการทดลอง

สมบัติ	ผลการทดสอบ
Total Solid (%)	61.55
Dry Rubber Content (%)	60.14
Non-Rubber Content (%)	1.41
NH <sub>3</sub> Content (%)	0.68
pH of Latex	10.65
KOH Number	0.42
Volatile Fatty Acid Number (VFA)	0.014
Mechanical Stability Time @ 55% TS (s)	690
Colour	White
Odour	Sweet
Mg (ppm)	25

ที่มา : เอกสารแสดงสมบัติของน้ำยางข้นผลิตโดยบริษัท Chana Latex จำกัด

2. ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) ชนิด Epoxyprene 50 (ENR-50) ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด

3. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassiumpermanganate, KMnO<sub>4</sub>) ผลิตโดยบริษัท Fluka

4. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassiumhydroxide, KOH) ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia จำกัด

5. โพแทสเซียมโบรไมด์ (potassium bromide, KBr) ผลิตโดยบริษัท Fluka, Ltd.
6. โทลูอีน (toluene,  $C_6H_5CH_3$ ) ผลิตโดยบริษัท Mallinckrodt Baker, Ltd.
7. คลอโรฟอร์ม (chloroform,  $CHCl_3$ ) ผลิตโดยบริษัท VWR International, Ltd.
8. เมทานอล (methanol,  $CH_3OH$ ) ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia, Ltd.
9. กรดฟอร์มิก (formic acid)
10. น้ำกลั่น
11. กรดสเตียริก (stearic acid) จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด
12. ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ชนิด white seal ผลิตโดยบริษัท Univenture Public Co., Ltd.
13. เตตระเมทิลไทูรามไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuramdisulphide, TMTD) ผลิตโดยบริษัท ห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด
14. ไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulphide, MBTS) ผลิตโดยบริษัท ห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด
15. กำมะถัน (sulfur, S) ผลิตโดยบริษัท สยามเคมี จำกัด

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องกวนสารรุ่น Heidolph RZR 2020 และใบพัดกวนสารชนิด 4 ใบพัดแบบ paddle
2. ชุดกรองสารแบบลดความดันรุ่น DOA-P104-BN และชุดกรอง ซึ่งประกอบด้วยกรวยกรองและขวดรองรับสาร
3. เครื่องระเหยสารแบบความดันต่ำรุ่น BUCHI Rotavapor R-200
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น Perkin Elmer spectrum GX FT-IR โดยมี resolution เท่ากับ 0.1
5. วิสโคมิเตอร์ (Viscometer) แบบอับเบลโหลด (Ubbelohde) รุ่น Schott Gruppe Postfach 1130 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลอดแคปิลารีเท่ากับ 0.53 mm
6. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) รุ่น YASUDA SEIKI 191-TM ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ความยาว 8 นิ้ว จำนวนสองลูกหมุนเข้าหากันด้วยความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1:1.22
7. เครื่องอัดยาง (compression molding) รุ่น KT-7014 ผลิตโดยบริษัท Kao tieh
8. เครื่องทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (moving die rheometer) รุ่น MDR 2000 ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies Survices Inc.
9. แม่พิมพ์ (mold) เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 13X13 cm โดยมีความหนา 1.5 mm

10. เครื่องทดสอบสมบัติการดึง (Universal testing machine) รุ่น LR10K ผลิตโดยบริษัท LLOYD จำหน่ายโดยบริษัท อินโทรเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด

11. เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ die C

12. ตู้อบปรนึ่ง รุ่น GPHH-100 ผลิตโดยบริษัท Tabai Espec Corp.

13. เครื่องวัดความหนาแบบ electronic digital caliper ความละเอียด 0.01 mm ยี่ห้อ

KOVET

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมและการศึกษาสมบัติของยางดัดแปร

##### 3.3.1.1 การเตรียมยางดัดแปร

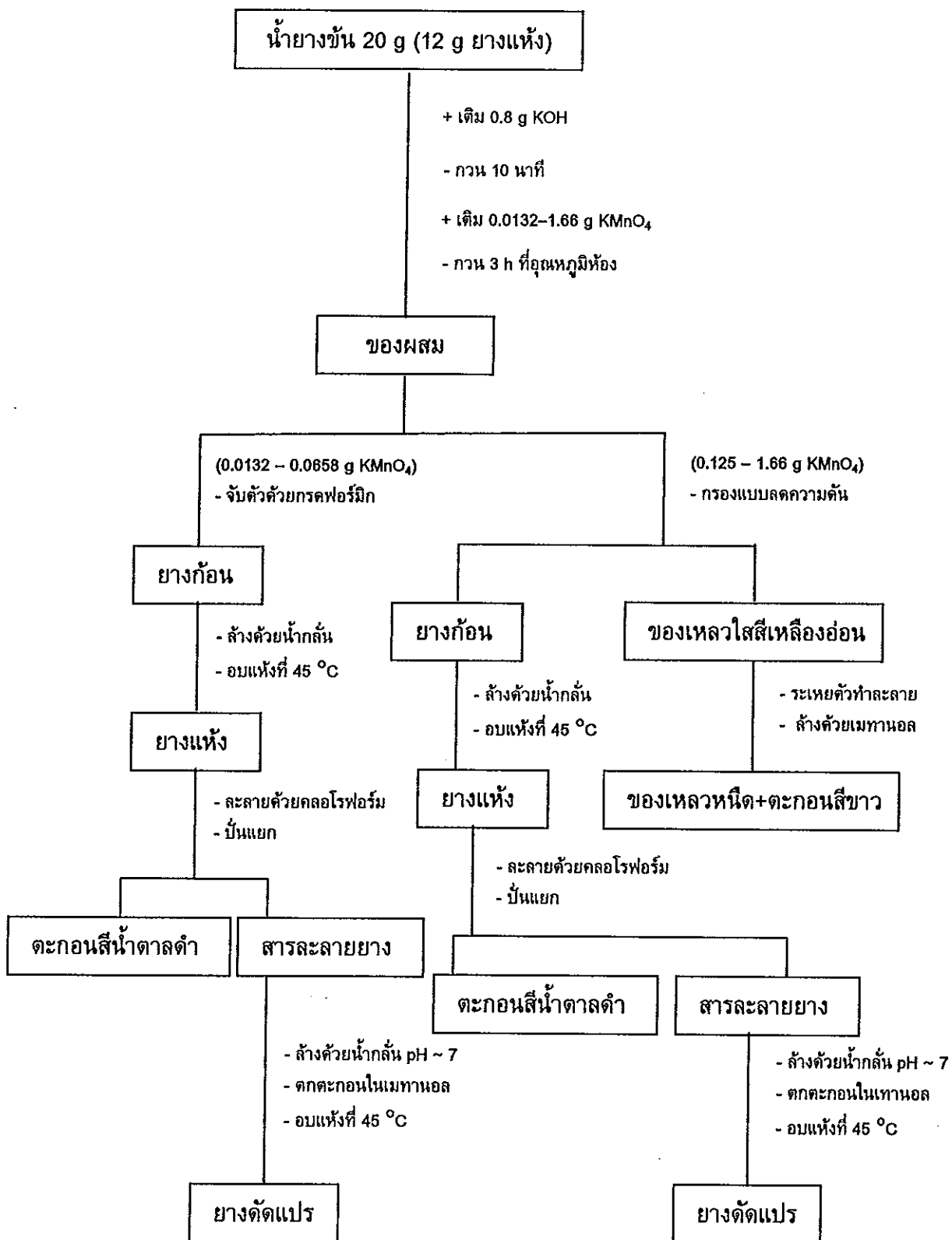
ทำการทดลองตามขั้นตอนแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3.1 โดยใช้น้ำยางชั้น 60% ของเนื้อยาง 20 g (คิดเป็นยางแห้ง 12 g) เจือจางด้วยน้ำกลั่น 500 mL เดิมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 0.8 g กวนให้ KOH กระจายตัวในน้ำยางเป็นเวลา 10 min จากนั้นนำโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) เดิมลงไปทีละน้อยจนหมด โดยใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เมื่อคิดต่อ 100 g ของน้ำหนักยางแห้งที่ใช้แตกต่างกันตั้งแต่ 0–1.66 g แสดงในตารางที่ 3.2 กวนของผสมให้  $\text{KMnO}_4$  เกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเป็นเวลา 3 h ได้ของผสมที่มีลักษณะสีน้ำตาลอ่อนเมื่อใช้ความเข้มข้นของ  $\text{KMnO}_4$  น้อย และจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อใช้  $\text{KMnO}_4$  มากขึ้น หลังจากนั้นนำของผสมที่ได้มาจับตัวด้วยกรดฟอร์มิคความเข้มข้น 20%v/v เพื่อแยกเนื้อยางออกจากการจับตัวเนื้อยางด้วยกรดฟอร์มิคทำให้ทราบว่าของผสมที่ได้จากการใช้  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณตั้งแต่ 0.125 g ขึ้นไปไม่สามารถจับตัวด้วยกรดได้ ต้องทำการแยกเนื้อยางออกจากของผสมโดยการกรองแบบลดความดันจะได้สารละลายใสสีเหลืองอ่อนและยาง นำส่วนที่เป็นเนื้อยางไปรีดเป็นแผ่นและอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 45 °C และส่วนของสารละลายใสสีเหลืองอ่อนนำไประเหยแห้งพบว่าตั้งแต่ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  0.83 g ขึ้นไป เมื่อระเหยน้ำจนหมดมีของเหลวลักษณะหนืดเหลืออยู่ และมีปริมาณมากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ในส่วนของยางแห้งเนื่องจากการปนเปื้อนของตะกอนสีน้ำตาลดำ โดยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ที่เติมลงไป ถ้าไม่แยกส่วนตะกอนนี้ออกอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาสมบัติต่าง ๆ หรือการนำไปทดลองในขั้นตอนอื่นๆ ได้ ขั้นตอนการแยกตะกอนออกทำได้โดยนำยางมาละลายด้วยคลอโรฟอร์ม ส่วนที่เป็นยางสามารถละลายได้ในคลอโรฟอร์ม แต่ส่วนของตะกอนสีน้ำตาลดำซึ่งไม่ละลายก็จะตกตะกอนออกมา หรือกระจายอยู่ในสารละลายยาง หลังจากนั้นนำไปปั่นแยกด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ด้วยความเร็วรอบในการปั่น 5,000 รอบต่อนาที แล้วดูเฉพาะส่วนของสารละลายยางมาทำการปั่นแยกต่อ โดยทดลองในลักษณะนี้ 5 ครั้ง นำส่วนของสารละลายที่ได้จากการปั่นแยกแล้ว 5 ครั้งมาล้างด้วยน้ำเพื่อทำการแยก KOH ที่ยังหลงเหลืออยู่ในยางออก โดยใช้ค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการล้างเป็นตัวบ่งบอก ซึ่งในการล้างครั้งแรกเมื่อวัดค่าพีเอชของน้ำพบว่ามีความเป็นด่างประมาณ 10.3 จึงมีความเป็นไปได้ว่าในน้ำมี KOH จากสารละลายยางละลายผสมอยู่เพราะ KOH มีความเป็นเบสจึงมีค่าพีเอชสูงและเมื่อล้างด้วยน้ำในครั้งต่อๆ ไปค่าพีเอชมีค่าลดลงและคงที่ประมาณ 7.4-7.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 โดยทำการล้างด้วยน้ำเป็นจำนวน 6 ครั้ง หลังจากนั้นแยกเนื้อยางออกจากคลอโรฟอร์มโดยการตกตะกอนในเมทานอล นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 °C

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

น้ำยางชั้น 60% DRC (g)	น้ำหนัก $\text{KMnO}_4$ (g) /100 g ยางแห้ง	น้ำกลั่น (mL)	KOH (g)
20	0.0132	500	0.8
20	0.0263	500	0.8
20	0.0395	500	0.8
20	0.0502	500	0.8
20	0.0658	500	0.8
20	0.125	500	0.8
20	0.25	500	0.8
20	0.50	500	0.8
20	0.83	500	0.8
20	1.25	500	0.8
20	1.45	500	0.8
20	1.66	500	0.8

\*หมายเหตุ: น้ำยางชั้น 60% DRC คิดเป็นยางแห้ง 12 g



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมยางตัดแปร

### 3.3.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของยางตัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR

บดโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) อัดในเบ้าอัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 mm ด้วยความดัน 10 tons/inch<sup>2</sup> ให้ได้เป็นแผ่นบางใส แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 120°C เพื่อกำจัดความชื้นที่อยู่ในแผ่น KBr อบและชั่งน้ำหนักจนกว่าน้ำหนักของแผ่น KBr คงที่ นำตัวอย่างยางตัดแปรละลายในคลอโรฟอร์มให้มีความเข้มข้น 0.5%w/v หลังจากนั้นนำมาหยดลงบนแผ่นฟิล์มบางของ KBr แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50°C เพื่อระเหยคลอโรฟอร์มที่อยู่ในยางออกแล้วชั่งน้ำหนักจนกว่าน้ำหนักของแผ่นฟิล์ม KBr คงที่ นำไปทดสอบกับเครื่อง FT-IR โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 4000–400 cm<sup>-1</sup> โดยใช้จำนวนการสแกนเท่ากับ 128

### 3.3.1.3 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ ) ของยาง

#### ตัดแปร

นำตัวอย่างยางมาละลายในโทลูอีนให้มีความเข้มข้น 0.05 g/dL บีบเปิดสารละลายยาง 15 mL ใส่เข้าไปในวิสโคมิเตอร์ซึ่งควบคุมอุณหภูมิของการทดสอบไว้ที่ 25°C รอจนอุณหภูมิของสารละลายยางในวิสโคมิเตอร์มีค่าเท่ากับ 25°C ดูดสารละลายยางให้ไหลขึ้นตามหลอดแคปิลารีจนถึงจุดที่กำหนดไว้ แล้ววัดค่าเวลาการไหลของสารละลายยางที่ไหลผ่านจุดที่กำหนดโดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง บีบเปิดโทลูอีน 5 mL เติมเพิ่มเข้าไปในวิสโคมิเตอร์ที่มีสารละลายยางอยู่เพื่อเจือจางสารละลายยาง หลังจากนั้นวัดเวลาการไหลของสารละลายยาง เจือจางและวัดเวลาการไหลของสารละลายยางที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 4 ความเข้มข้น แล้วนำมาคำนวณค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการหาค่า  $\bar{M}_v$  ดังนี้

$$\eta_r = t/t_0 \quad (3.1)$$

$$\eta_{sp} = (t/t_0) - 1 \quad (3.2)$$

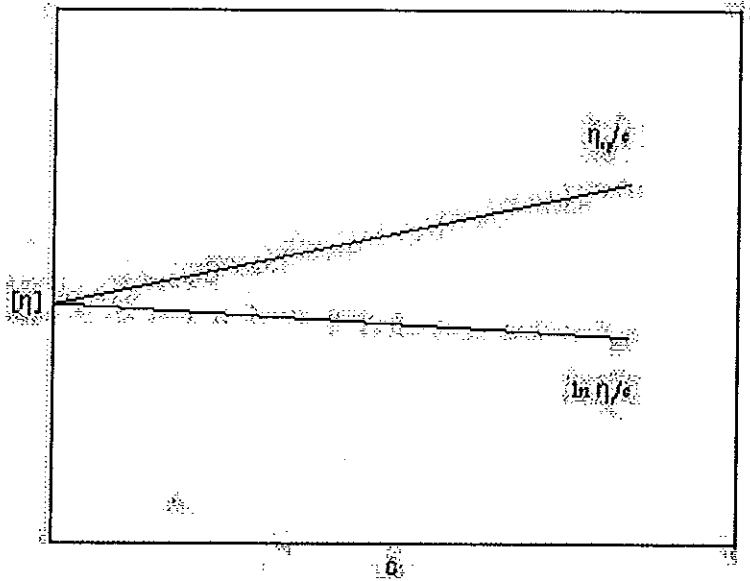
เมื่อ  $\eta_r$  = ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity)

$\eta_{sp}$  = ความหนืดจำเพาะ (specific viscosity)

t = เวลาการไหลของสารละลายยางเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ

$t_0$  = เวลาการไหลของตัวทำละลายบริสุทธิ์

นำค่า  $\eta_r$  และ  $\eta_{sp}$  มาคำนวณหาค่า  $\ln \eta_r/c$  และ  $\eta_{sp}/c$  โดย  $c$  คือความเข้มข้นของสารละลายยาง เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \eta_r/c$  กับ  $c$  และ  $\eta_{sp}/c$  กับ  $c$  เพื่อหาจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองซึ่งเป็นค่า intrinsic viscosity ( $[\eta]$ ) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \eta_r/c$  และ  $\eta_{sp}/c$  กับความเข้มข้นของสารละลาย ( $c$ )

นำไปแทนค่าในสมการ

$$[\eta] = K\bar{M}_v^a \quad (3.3)$$

เมื่อ  $[\eta]$  = intrinsic viscosity

$\bar{M}_v$  = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด

$K$  และ  $a$  เป็นค่าคงที่ในกรณีของยางธรรมชาติเท่ากับ  $50.2 \times 10^{-5}$  dL/g

และ 0.667 ตามลำดับ ที่  $25^\circ\text{C}$  และใช้โทลูอีน

เป็นตัวทำละลาย (Brandrup, 1999)



### 3.3.1.4 การศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางดัดแปร

เนื่องจากการทดลองนี้คาดหวังว่า ยางดัดแปรที่เกิดขึ้นน่าจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในโครงสร้าง ซึ่งหมู่ OH เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว จึงเป็นไปได้ว่ายางดัดแปรอาจสามารถดูดซับน้ำได้ การทดลองทำได้โดยการตัดชิ้นตัวอย่างยางดัดแปร แล้วชั่งน้ำหนักก่อนนำไปแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 20 mL บันทึกน้ำหนักทุกๆ 24 h โดยการบันทึกน้ำหนักในแต่ละครั้งต้องตัดชิ้นตัวอย่างยางดัดแปรมาชั่งน้ำให้แห้งก่อนการบันทึกทุกครั้ง และทำการบันทึกน้ำหนักจนกว่าชิ้นตัวอย่างยางดัดแปรมีน้ำหนักคงที่ นำค่าที่ได้ไปคำนวณปริมาณการบวมตัวตามสมการที่ 3.4

$$\text{ปริมาณการบวมตัว (\%)} = \left[ \frac{M_2 - M_1}{M_1} \right] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $M_2$  = น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังจากผ่านการแช่ในน้ำกลั่น  
 $M_1$  = น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างก่อนแช่ในน้ำกลั่น

### 3.3.1.5 การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางดัดแปร

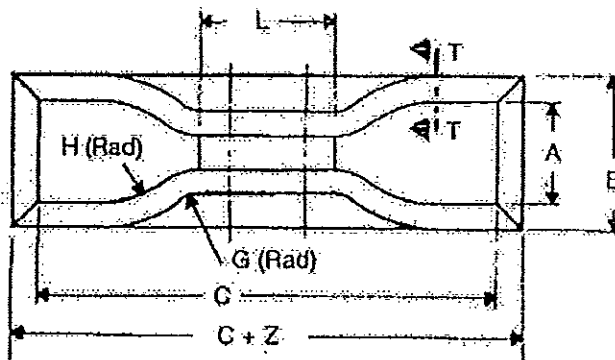
นำตัวอย่างยางดัดแปรละลายด้วยคลอโรฟอร์ม จากนั้นเทลงในเบ้าเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง ปล่อยให้คลอโรฟอร์มระเหยที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งแผ่นยางแห้งจึงแกะออกจากเบ้า นำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 45°C ชั่งน้ำหนักจนกว่าแผ่นฟิล์มยางมีค่าคงที่เพื่อป้องกันผลของตัวทำละลายที่หลงเหลือในยางดัดแปร เพราะอาจทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดจากความเป็นจริง นำแผ่นยางตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ die C ดังรูปที่ 3.3 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่งในช่วงระยะ L หาค่าเฉลี่ยของความหนา นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงโดยใช้ความเร็วในการดึง 500 mm/min บันทึกค่าความเค้นที่จุดขาด (stress at break) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าความทนต่อแรงดึง} = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $F$  = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด ( $\text{mm}^2$ )

$$\text{ค่าระยะยืด ณ จุดขาด} = \left[ \frac{L - L_0}{L_0} \right] \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $L$  = ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด  
 $L_0$  = ระยะที่กำหนดก่อนการทดสอบ



รูปที่ 3.3 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ die C

### 3.3.1.6 การกำหนดสัญลักษณ์ของยางตัดแปร

สัญลักษณ์ ONR-XY ตัวอย่าง ONR-2.63R

เมื่อ

ONR คือ ยางธรรมชาติที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ  $\text{KMnO}_4$

X คือ (น้ำหนักของ  $\text{KMnO}_4$  (g)/100 g ของยางแห้ง) x 100 (%) เช่น

0.0263 g เป็น 2.63%

Y คือ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดย R มีลักษณะเป็นยาง

### 3.3.2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร

#### 3.3.2.1 การเตรียมยางผสมระหว่าง NR กับ ONR

นำตัวอย่างยางดัดแปรที่เตรียมได้ไปทำการผสมกับยางธรรมชาติเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ โดยมีขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ดังนี้

##### 1. สูตรยางผสมแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรยางคอมปาวด์ของยางผสมระหว่าง NR/ONR

ส่วนประกอบ	phr
NR/ONR (100/0, 90/10, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80)	100
ZnO	5
Stearic acid	3
TMTD	0.5
MBTS	1
Sulfur	2

2. ผสมยางตามสูตรด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง โดยขั้นแรกทำการบดยางธรรมชาติให้มีขนาดโมเลกุลสั้นลงแล้วนำยาง ONR ผสมให้เข้ากับยางธรรมชาติ จากนั้นเติมสารเคมีในตารางที่ 3.3 ตามลำดับ (ที่สัดส่วนของยาง NR/ONR = 20/80 ในขั้นตอนการบดยางทั้งสองชนิดให้เข้ากันต้องค่อยๆ เติม ZnO ลงไปด้วยเนื่องจากปริมาณของยาง ONR มีมากทำให้เหนียวติดลูกกลิ้ง การเติม ZnO ลงไปพร้อมกันด้วยจะทำให้การติดลูกกลิ้งน้อยลง)

3. เมื่อเติมสารเคมีจนครบทุกชนิดแล้วทำการรีดยางเป็นแผ่น และเก็บยางคอมปาวด์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 h เพื่อลดอุณหภูมิของยางหลังจากการผสมและเป็นการปรับสภาพของยางคอมปาวด์ก่อนนำไปหาค่าเวลาในการวัลคาไนซ์และขึ้นรูปต่อไป

4. นำยางคอมปาวด์ปริมาณ 4.5 g ไปหาค่าเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางผสม ( $t_{90}$ ) ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C

5. ขึ้นรูปยางคอมปาวด์ด้วยวิธีการอัดเข้าด้วยเวลาที่หาได้จากเครื่อง MDR ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 150°C ความดัน 2500 psi แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ที่ต้องการ

### 3.3.2.2 การศึกษาสมบัติของยางผสม (NR/ONR blend)

#### 1. การทดสอบความทนต่อแรงดึง

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปแล้วตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ die C วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่งในช่วงระยะ L ดังรูปที่ 3.3 แล้วทำการทดสอบตามข้อ 3.3.1.5

#### 2. การทดสอบการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลาย

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปแล้วมาตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดเล็ก ซึ่งน้ำหนักแล้วนำไปแช่ในน้ำมันซิลิโคนและตัวทำละลายโทลูอีน ซึ่งน้ำหนักจนกว่าชิ้นตัวอย่างจะมีน้ำหนักคงที่เนื่องจากอิมัลชันในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีน บันทึกน้ำหนักสุดท้าย แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สูตรคำนวณตามสมการที่ 3.4 โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

#### 3. การทดสอบการบวมแรง

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปแล้วตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ die C เช่นเดียวกับการทดสอบความทนต่อแรงดึง และนำส่วนที่เหลือตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดเล็กสำหรับการทดสอบความทนต่อน้ำมันและตัวทำละลาย นำชิ้นทดสอบทั้งสองแบบอบในตู้อบ โดยใช้สภาวะการอบตามมาตรฐาน ASTM D573 ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดนำชิ้นทดสอบเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 12 h ก่อนนำไปทดสอบเพื่อเป็นการปรับสภาพของชิ้นทดสอบ ทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามข้อ 3.3.1.5 และการทดสอบการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายตามข้อ 2 ของหัวข้อ 3.3.2.2 แล้วนำค่าที่ได้คำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงตามสูตรคำนวณ ดังนี้

$$P = \left[ \frac{A - O}{O} \right] \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ P คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (%)

O คือ ค่าสมบัติของยางก่อนการบวมแรง

A คือ ค่าสมบัติของยางหลังการบวมแรง

### 3.3.3 การประยุกต์ใช้งานยางดัดแปรในรูปของสารช่วยผสม (compatibilizer)

ทำการเตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยมียางดัดแปร (ONR) เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0-30 phr ใช้สูตรยางตามตารางที่ 3.3 วิธีการเตรียมยางผสม การขึ้นรูป และการทดสอบสมบัติต่างๆเหมือนกับหัวข้อ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติของยางตัดแปร

##### 4.1.1 การเตรียมยางตัดแปร

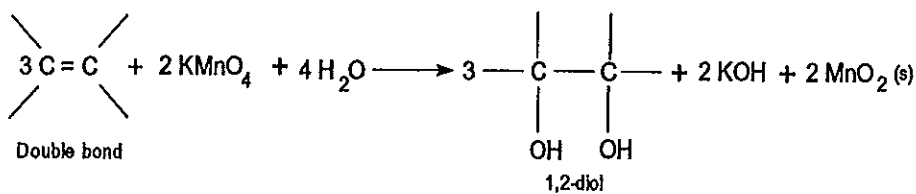
จากแผนภูมิในรูปที่ 3.1 ลักษณะของของผสมที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) มีสีน้ำตาลอ่อนเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ต่ำ (0.0132-0.0658 g) แต่เมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มขึ้น (0.125-1.66 g) สีของของผสมมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นจนเป็นสีดำ เมื่อนำของผสมจับตัวด้วยกรดฟอร์มิก (ปริมาณ  $\text{KMnO}_4$  0.0132-0.0658 g) หรือกรองแบบลดความดัน (ปริมาณ  $\text{KMnO}_4$  0.125-1.66 g) พบว่าได้ของแข็งที่มีลักษณะยึดหยุ่นคล้ายยางธรรมชาติจึงเรียกผลิตภัณฑ์ในส่วนนี้ว่ายางก้อน และเมื่อนำยางก้อนล้างด้วยน้ำกลั่นและอบที่อุณหภูมิ 45 °C ได้ลักษณะเป็นยางแห้ง แต่ในการทดลองที่ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ตั้งแต่ 0.83 g ขึ้นไปมีของเหลวหนืดเกิดขึ้นด้วย โดยสามารถสรุปลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นกับปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ได้ดังตารางที่ 4.1 ในส่วนของยางแห้งเมื่อนำไปละลายด้วยคลอโรฟอร์มพบว่ามีตะกอนสีน้ำตาลดำเจือปนอยู่ในสารละลายแยกตะกอนออกโดยการนำไปปั่นด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ทำให้สารละลายยางมีความใสขึ้น และเมื่อนำสารละลายยางมาผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้ง จนค่าพีเอชของน้ำกลั่นที่ผ่านการล้างมีค่า ประมาณ 7 และนำสารละลายยางตกตะกอนในเมทานอลเพื่อให้ได้เนื้อยางกลับคืนมาพบว่าสีของยางจางลง สาเหตุเกิดจากตะกอนสีน้ำตาลดำที่เจือปนอยู่ในยางในตอนแรกถูกกำจัดออกไป โดยกระบวนการที่กล่าวมาแล้วทำให้ยางมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ก่อนนำไปทดสอบหรือประยุกต์ใช้งานอื่นๆต่อไป จึงขอเรียกยางในส่วนที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์นี้ว่ายางตัดแปร (Oxidized natural rubber, ONR)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$

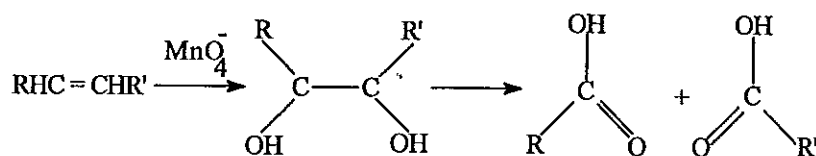
น้ำหนัก $\text{KMnO}_4(\text{g})/100 \text{ g}$ ของยางแห้ง	ผลิตภัณฑ์	ลักษณะทางกายภาพ
0.0132-0.0502	ยางตัดแปร	-สีคล้ายยางธรรมชาติ
0.0658-0.5	ยางตัดแปร	-มีสีน้ำตาลดำ -มีลักษณะเหนียวที่ผิว
0.83-1.66	ยางตัดแปร ของเหลวหนืด	-มีสีน้ำตาลดำ -มีลักษณะเหนียวที่ผิว -เป็นของเหลวหนืดมีสีน้ำตาล -มีความลื่นคล้ายน้ำมัน

#### 4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของยางตัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR

สมการในรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ลักษณะสเปกตรัมของยางตัดแปรที่ถูกทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR และตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) (Mercangoz, 2003)



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาโอเวอร์-ออกซิเดชัน (over-oxidation) (Mercangoz, 2003)

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 พบว่าลักษณะสเปกตรัมที่เกิดของยาง NR, ONR-2.63R และ ONR-5.02R มีความแตกต่างกัน โดยยาง ONR-2.63R และ ONR-5.02R มีหมู่ฟังก์ชันใหม่เพิ่มขึ้นจากลักษณะสเปกตรัมของยาง NR เดิม คือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3430 และ 1720  $\text{cm}^{-1}$  และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ที่ใช้เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นการยึดของพันธะ O-H และ C=O ตามลำดับ ในทางกลับกันพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1650  $\text{cm}^{-1}$  มีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ C=C แสดงว่า  $\text{KMnO}_4$  ที่เติมลงไปเข้าไปทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะ C=C ทำให้พันธะชนิดนี้แตกออกกลายเป็นพันธะซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันชนิดอื่น เช่น C=O ที่เลขคลื่นประมาณ 1720  $\text{cm}^{-1}$  และ OH ที่เลขคลื่น 3430  $\text{cm}^{-1}$

จากลักษณะของสเปกตรัมซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏของยางดัดแปร เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ปรากฏในยางดัดแปรสอดคล้องกับที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮดรอกซิลเลชัน ดังรูปที่ 4.1 แต่หมู่คาร์บอนิล (C=O) สอดคล้องกับที่ปรากฏในปฏิกิริยาโอเวอร์-ออกซิเดชัน ดังรูปที่ 4.2 จึงเป็นไปได้ว่าการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  อาจเป็นไปได้ทั้งสองแบบคือ ไฮดรอกซิลเลชัน และโอเวอร์-ออกซิเดชัน โดยไฮดรอกซิลเลชันทำให้มีหมู่ O-H เกิดขึ้น และ โอเวอร์-ออกซิเดชันทำให้มีหมู่ C=O เกิดขึ้น หรือการที่มีหมู่ C=O เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนทำให้สายโซ่ของยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยา thermal oxidation จนมีหมู่ C=O เกิดขึ้น

ส่วนลักษณะสเปกตรัมของยางดัดแปรอื่นๆแสดงในรูปที่ 4.4-4.11 จากลักษณะสเปกตรัมพบว่า มีหมู่ OH และ C=O เกิดขึ้นใหม่ และหมู่ C=C มีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยางดัดแปร ONR-2.63R และ ONR-5.02R ซึ่งเหตุผลก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งเลขคลื่นแสดงหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของยาง NR, ONR-2.63R และ ONR-5.02R

เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	NR	ONR-2.63R	ONR-5.02R
3430	-	การยึดพันธะ O-H	การยึดพันธะ O-H
2960, 2930 และ 2850	การยึดพันธะ C-H	การยึดพันธะ C-H	การยึดพันธะ C-H
1720	-	การยึดพันธะ C=O	การยึดพันธะ C=O
1650	การยึดพันธะ C=C	การยึดพันธะ C=C	การยึดพันธะ C=C
1450 และ 1380	การงอพันธะ C-H	การงอพันธะ C-H	การงอพันธะ C-H

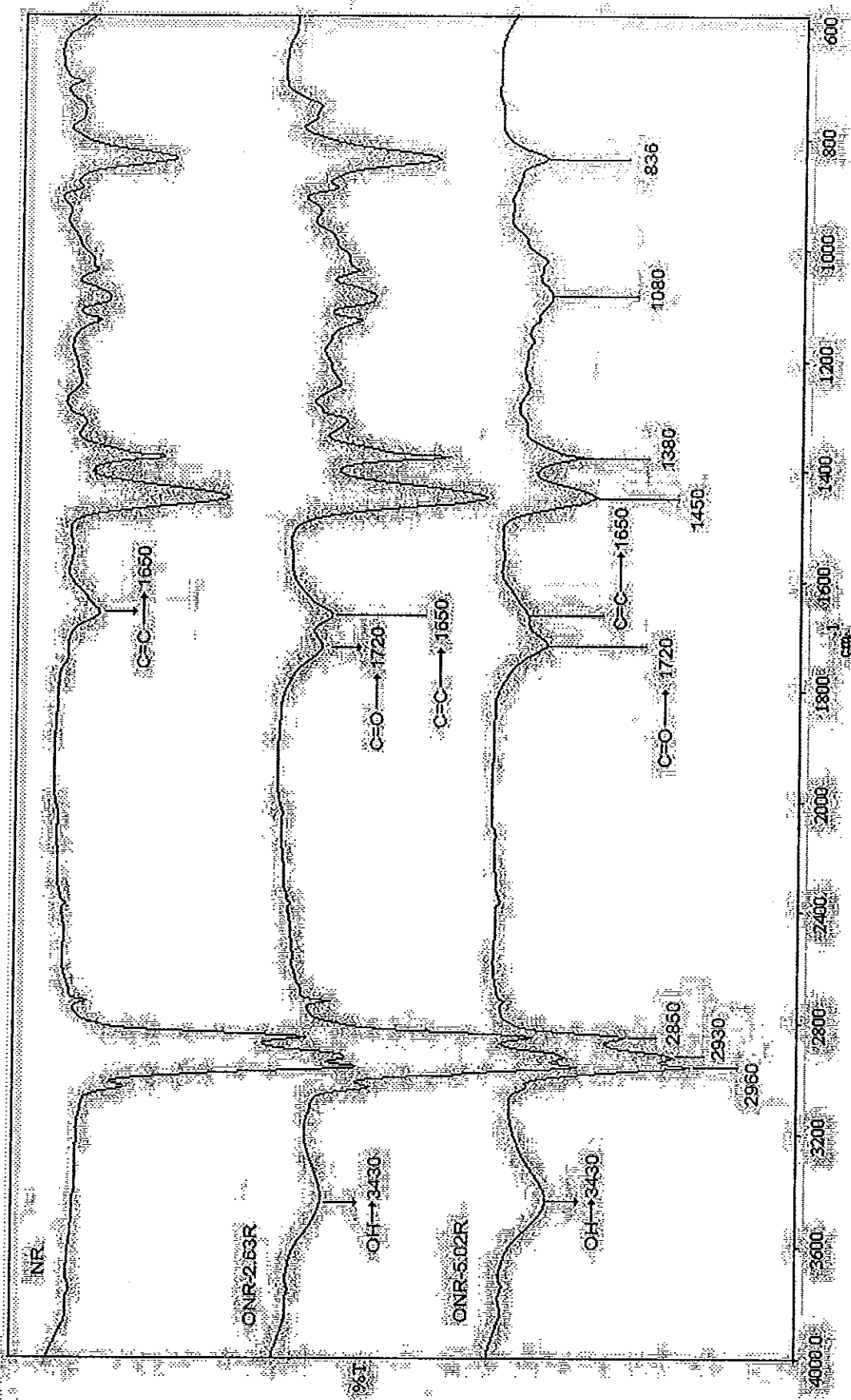
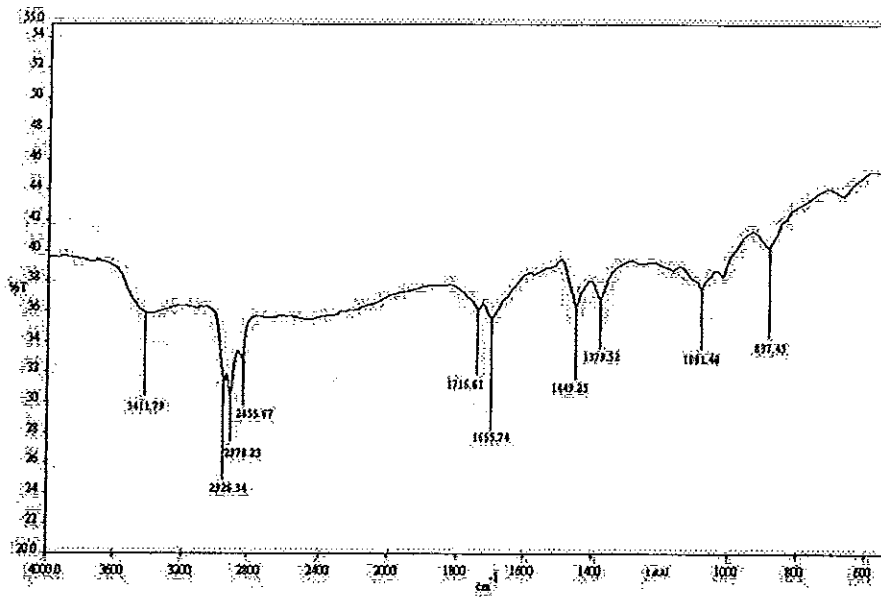
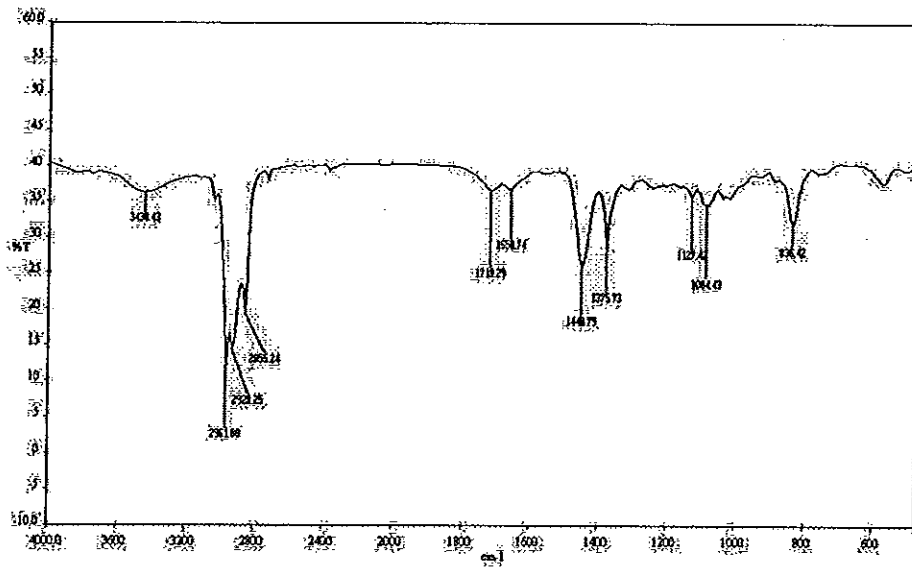


Figure 4-3 FT-IR spectra of NR, ONR-2.63R and ONR-5.02R

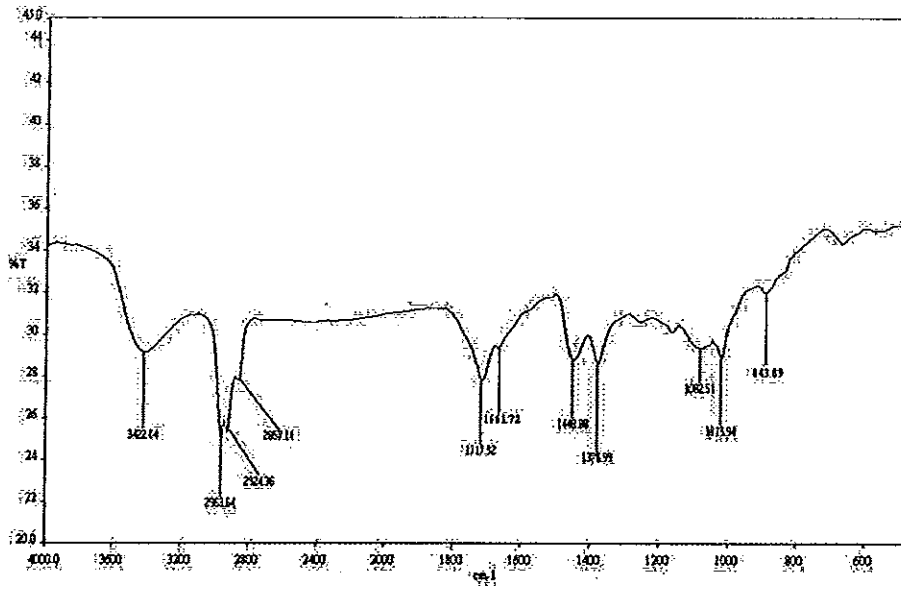




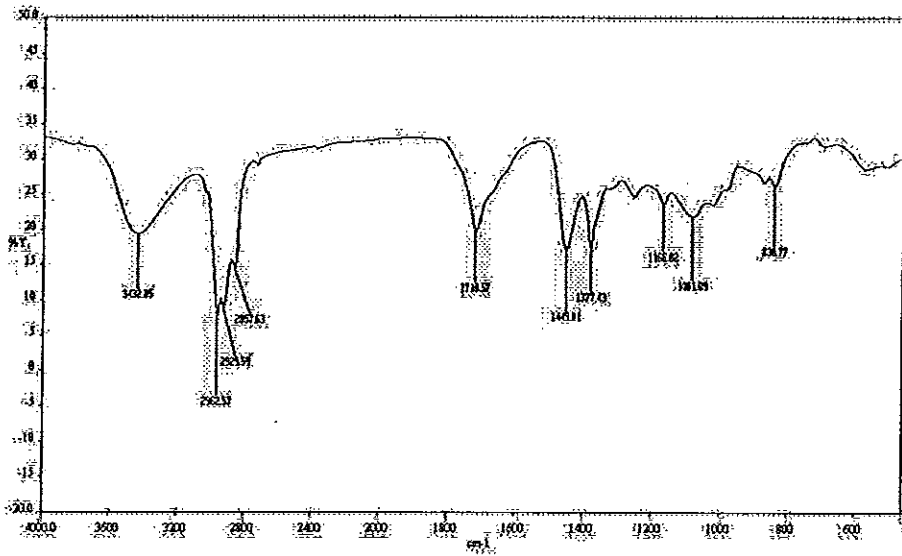
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-1.32R



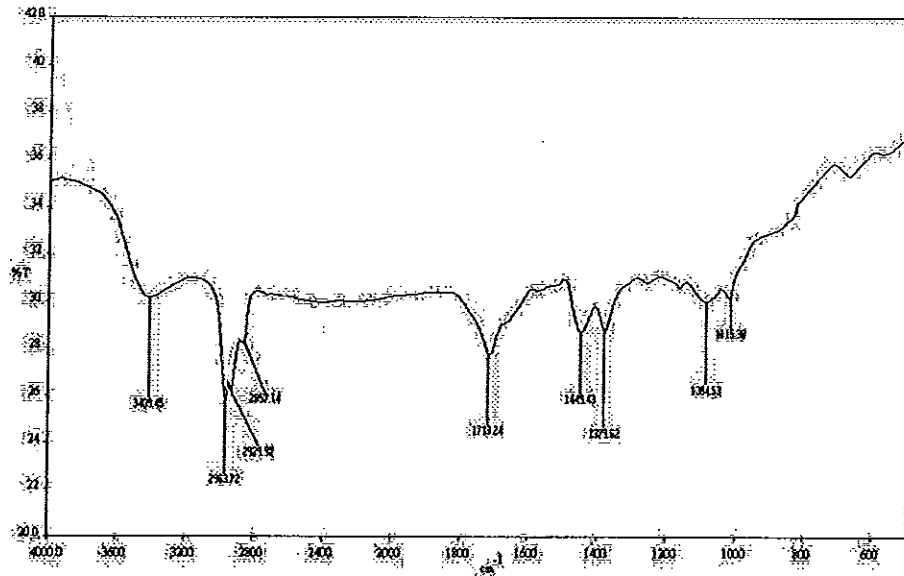
รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-3.95R



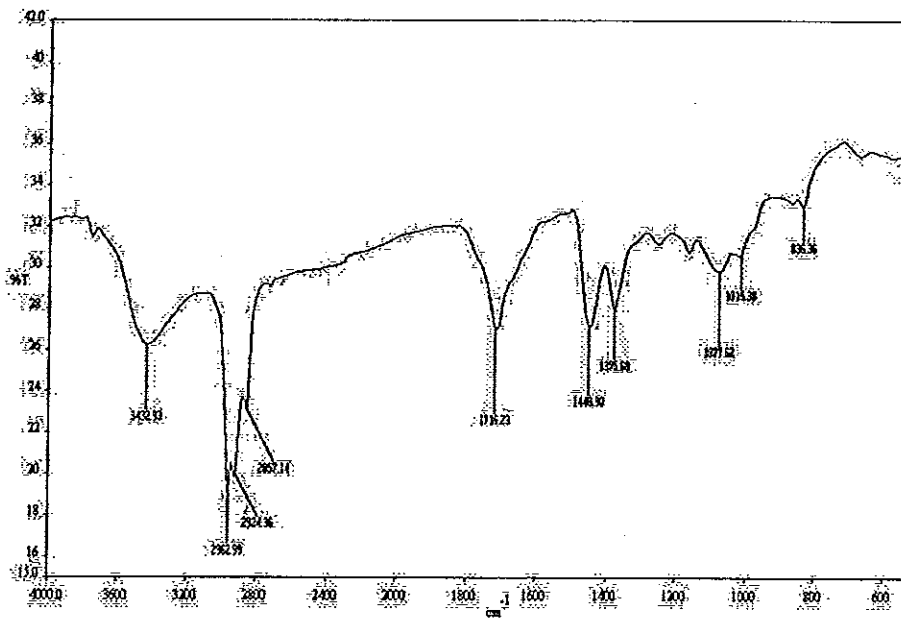
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-6.58R



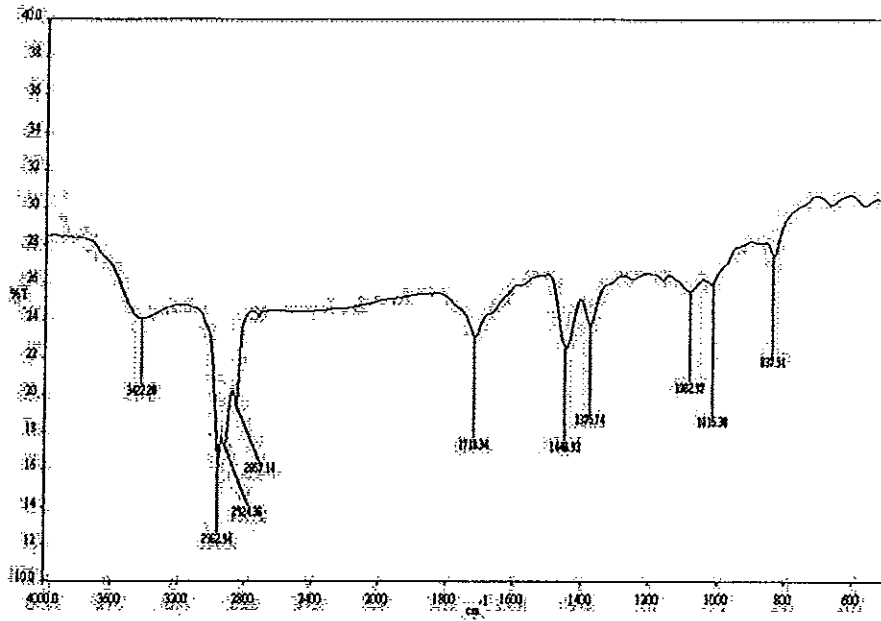
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-12.50R



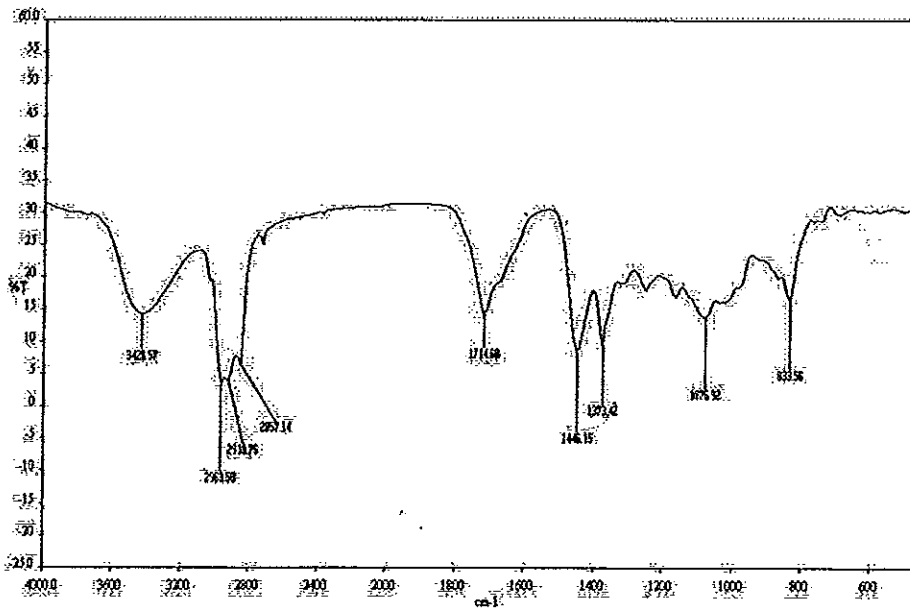
รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-25.00R



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-50.00R



รูปที่ 4.10 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-83.00R



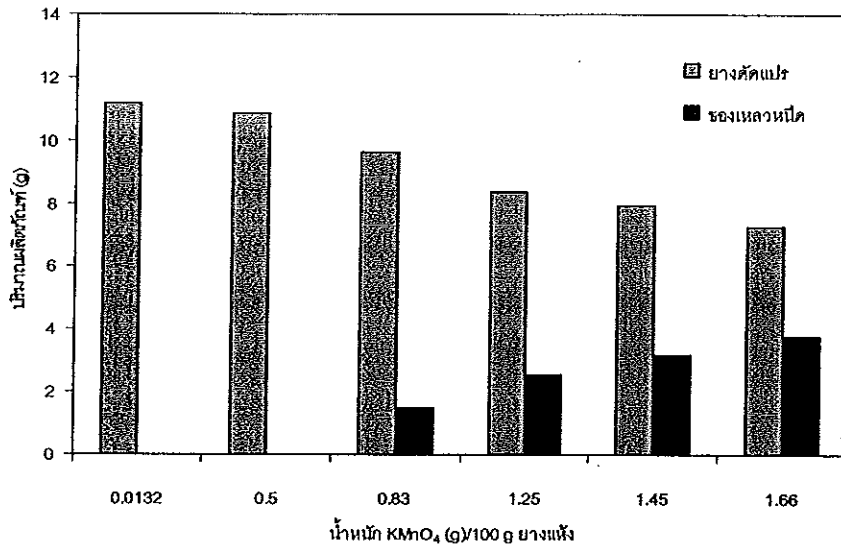
รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของยางดัดแปร ONR-125.00R

#### 4.1.3 การศึกษาปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถแยกได้สองส่วนคือ ส่วนที่เป็นยางดัดแปรที่สามารถจับตัวด้วยกรดฟอร์มิคได้รวมทั้งส่วนที่ไม่สามารถจับตัวด้วยกรดฟอร์มิค แต่สามารถแยกออกมาด้วยวิธีการกรองแบบลดความดัน และส่วนที่เป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลที่ได้จากการระเหยน้ำออกจนหมดของสารละลายใส่สีเหลืองอ่อน จากตารางที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักของส่วนที่เป็นยางมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ตั้งแต่ 0.0132–0.5 g หลังจากนั้นน้ำหนักของส่วนที่เป็นยางลดลงเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มขึ้นจนถึง 1.66 g เมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เท่ากับ 0.83 g เป็นปริมาณที่ทำให้น้ำหนักของส่วนที่เป็นยางเริ่มลดลง และเป็นปริมาณเดียวกันที่มีส่วนของของเหลวหนืดสีน้ำตาลเกิดขึ้น และเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.12 สาเหตุที่ทำให้ส่วนที่เป็นยางลดลงและมีของเหลวหนืดเกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ตั้งแต่ 0.83–1.66 g อาจเป็นเพราะปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ที่มากขึ้นเข้าไปตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติจนทำให้มีขนาดโมเลกุลสั้น จนหมดสภาพความเป็นยางเมื่อจับตัวด้วยกรดฟอร์มิคโมเลกุลที่สั้นจึงไม่สามารถจับตัวเป็นยางได้อีก

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้น 20 g (ยางแห้ง 12 g) กับ  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง

น้ำหนัก $\text{KMnO}_4$ (g)/100 g ยางแห้ง	ยางดัดแปร (g)	ของเหลวหนืด (g)
0.0132	11.18	-
0.0263	11.26	-
0.0395	11.02	-
0.0502	11.31	-
0.0658	10.89	-
0.125	11.14	-
0.25	11.08	-
0.50	10.87	-
0.83	9.63	1.49
1.25	8.38	2.56
1.45	7.94	3.19
1.66	7.26	3.77



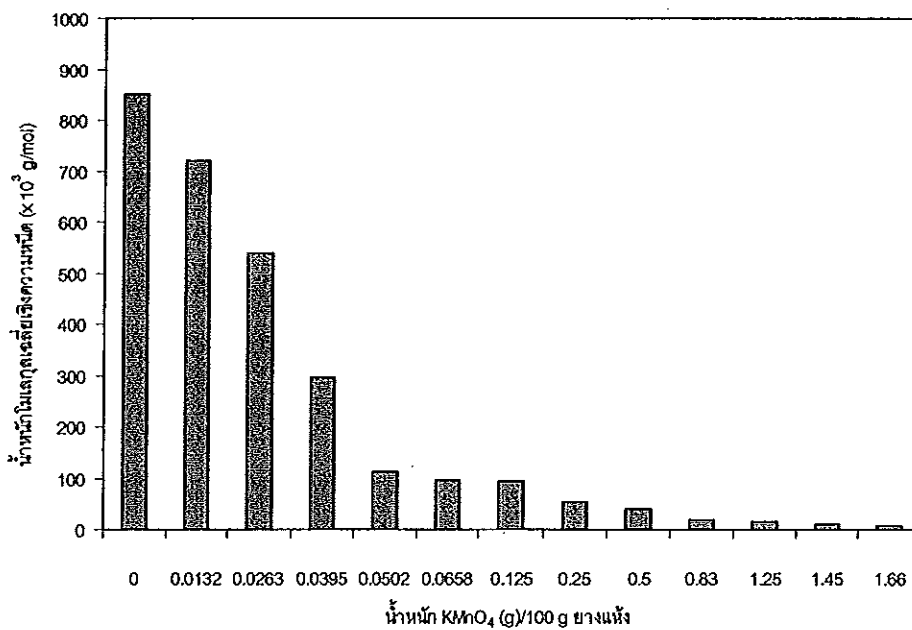
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักยางตัดแปรและของเหลือหนืดกับปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$

#### 4.1.4 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ ) ของยางตัดแปร

น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ ) และ อินทรินซิกวิสโคซิตี  $[\eta]$  ของยางตัดแปรแสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13 พบว่ายางตัดแปรที่เกิดปฏิกิริยากับ  $\text{KMnO}_4$  มีค่า  $\bar{M}_v$  ลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของ  $\text{KMnO}_4$  เข้าไปทำปฏิกิริยากับสายโซ่ของยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยอาจเกิด ปฏิกิริยาแบบการเปิดพันธะกลายเป็นพันธะเดี่ยว หรือเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติตรงตำแหน่งนี้ได้ด้วยเช่นกัน ทำให้มีความยาวของสายโซ่ลดลง น้ำหนักโมเลกุลจึงลดลงตามไปด้วย และยิ่งปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มมากขึ้นการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.4 ค่า  $[\eta]$  และ  $\bar{M}_v$  ของยางดัดแปร

น้ำหนัก $\text{KMnO}_4(\text{g})/100 \text{ g}$ ยางแห้ง	$[\eta]$ (dL/g)	$\bar{M}_v$ ( $\times 10^3 \text{ g/mol}$ )
0	4.50	850
0.0132	4.17	720
0.0263	3.36	540
0.0395	2.23	295
0.0502	1.18	112
0.0658	1.07	97
0.125	1.04	93
0.25	0.72	54
0.50	0.60	41
0.83	0.37	19
1.25	0.32	15
1.45	0.24	10
1.66	0.21	8.5



รูปที่ 4.13 ค่า  $\bar{M}_v$  ของยางธรรมชาติเมื่อทำปฏิกิริยากับ  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณแตกต่างกัน

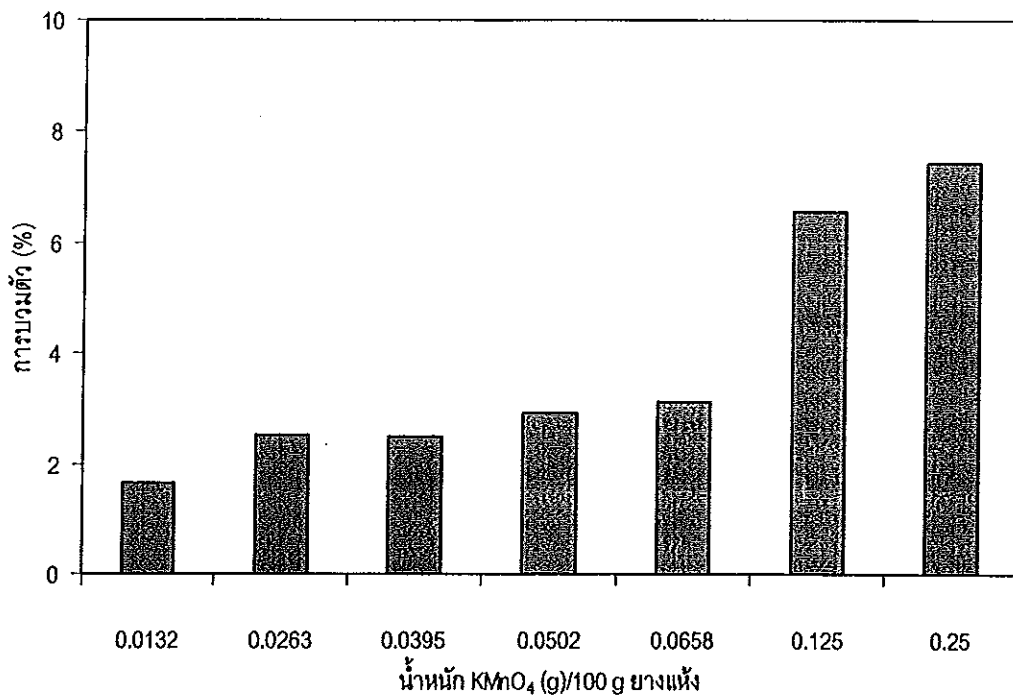
#### 4.1.5 การศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางตัดแปร

การบวมตัวในน้ำกลั่นของยางตัดแปรแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.14 ซึ่งทำการทดสอบได้เฉพาะยางตัดแปรที่ใช้ปริมาณ  $\text{KMnO}_4$  ในช่วง 0-0.25 g เท่านั้นเนื่องจากที่ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  สูงกว่านี้ยางตัดแปรมีลักษณะเหนียวไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบได้ พบว่า ปริมาณการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางตัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  มากขึ้น เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ มีหมู่ฟังก์ชันใหม่เกิดขึ้นซึ่งทำให้อย่างมีการดูดซับน้ำเข้ามาภายในโมเลกุลได้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอนิล (C=O) โดยปริมาณของหมู่ OH และ C=O ที่เกิดขึ้นขึ้นกับปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ที่ทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติด้วย ซึ่งสังเกตได้จากการทดลองโดยเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มมากขึ้น ปริมาณการบวมตัวในน้ำกลั่นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยนั่นหมายความว่า มีหมู่ฟังก์ชัน OH และ C=O เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 การบวมตัวในน้ำกลั่นของยางตัดแปรเมื่อใช้  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณแตกต่างกัน

น้ำหนัก $\text{KMnO}_4(\text{g})/100 \text{ g}$ ยางแห้ง	การบวมตัว (%)
0	0.00
0.0132	1.64
0.0263	2.51
0.0395	2.49
0.0502	2.92
0.0658	3.12
0.125	6.57
0.25	7.44





รูปที่ 4.14 ปริมาณการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางตัดแปรเมื่อใช้  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณแตกต่างกัน

#### 4.1.6 ผลการศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางตัดแปร

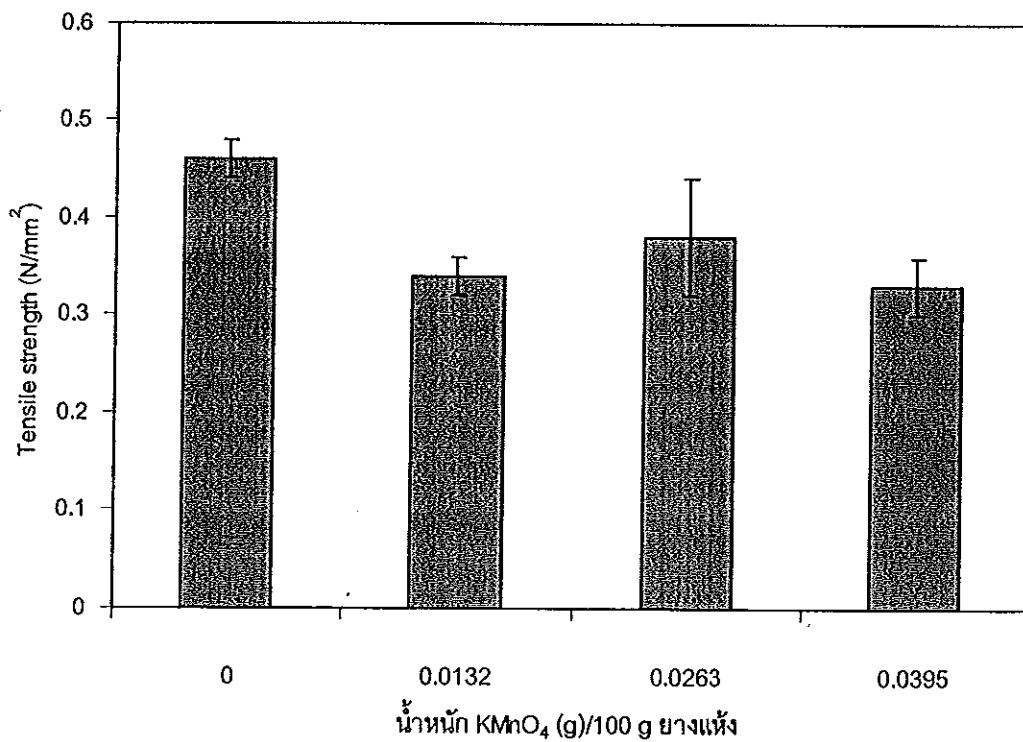
ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของยางตัดแปร สามารถทำได้เฉพาะยางที่ใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ในช่วง 0–0.0395 g เท่านั้น เนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปทำโดยวิธีการละลายยางแล้วนำมาเทในเบ้าเพื่อทำเป็นแผ่นฟิล์มบาง แต่ยางตัดแปรที่ใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  สูงกว่า 0.0395 g ไม่สามารถนำมาเทเพื่อทำเป็นแผ่นฟิล์มบางได้ เพราะเมื่อเทลงไป เบ้าและร่อนตัวทำละลายระเหย แผ่นยางมีความเหนียวจนไม่สามารถแกะออกมาเป็นแผ่นเพื่อนำไปตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ต่อไปได้ จึงทำการทดสอบได้เฉพาะยางตัดแปรที่ได้กล่าวมาแล้วเท่านั้น ผลการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และ ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.15 และ 4.16

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ของยางตัดแปรมีค่าลดลงเมื่อยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับ  $\text{KMnO}_4$  แต่ค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันไม่มากนักเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มมากขึ้น การที่ค่าทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากผลของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ของยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  มีการตัดสายโซ่ของโมเลกุลยางทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และเมื่อใช้  $\text{KMnO}_4$  เพิ่มมาก

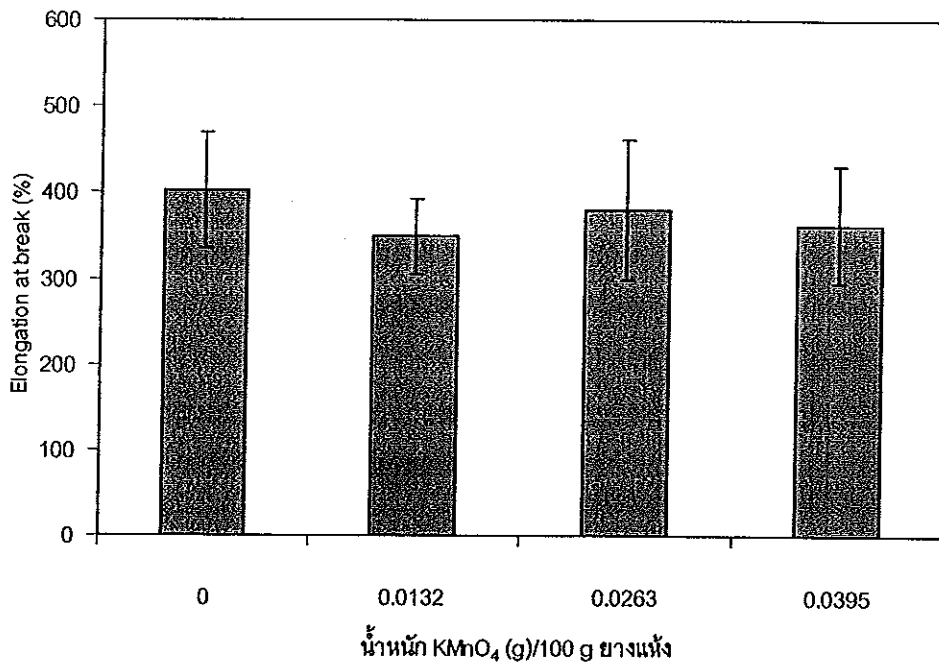
ขึ้นการตัดสายโซ่ของโมเลกุลยางก็มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนต่อแรงดึง และ ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางตัดแปรเมื่อใช้ ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  แตกต่างกัน

น้ำหนัก $\text{KMnO}_4$ (g)/100 g ยางแห้ง	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
0	$0.46 \pm 0.02$	$403 \pm 67$
0.0132	$0.34 \pm 0.02$	$349 \pm 44$
0.0263	$0.38 \pm 0.06$	$381 \pm 81$
0.0395	$0.33 \pm 0.03$	$363 \pm 69$



รูปที่ 4.15 ความทนต่อแรงดึงของยางตัดแปรเมื่อใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  แตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางดัดแปรเมื่อใช้ปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  แตกต่างกัน

#### 4.2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร

การทดสอบสมบัติของยางผสมเมื่อนำยางดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) มาคอมปาวด์ผสมกับยางธรรมชาติและสารเคมีตามสูตรต่างๆ โดยยางดัดแปรที่นำมาศึกษาคือ ยางธรรมชาติที่ทำปฏิกิริยากับ  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณ 0.0263 g เนื่องจากมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงที่สุด (หัวข้อ 4.1.6) ซึ่งจะเรียกในการกล่าวครั้งต่อไปว่ายาง ONR-2.63R โดยสมบัติต่างๆ ของยางผสมที่ทำการทดสอบมีดังต่อไปนี้

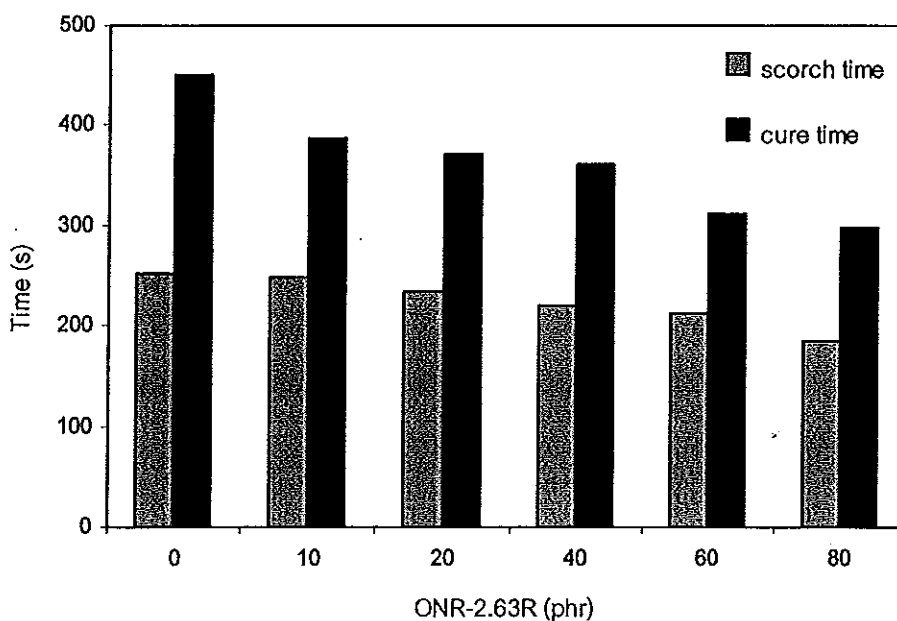
##### 4.2.1 การทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร ONR-2.63R

ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมแต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.17 จากตารางและรูปพบว่าค่า scorch time และ cure time ของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าถ้ายางมีความเป็นเบสค่า scorch time และ cure time จะมีค่าลดลง (พรพรรณ, 2528) เนื่องจากถ้าในสูตรยางมีการเติมสารที่มีความเป็นกรดสารเหล่านั้นจะดูดสารตัวเร่ง ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ช้าลง ค่า scorch time และ cure time จึงเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีการเติมสารที่มีความเป็นเบสสารนั้นจะ

ช่วยเร่งให้การวัลคาไนซ์เกิดเร็วขึ้น ค่า scorch time และ cure time จึงลดลง โดยจากสูตรของยางผสมพบว่ายาง ONR-2.63R มีความเป็นเบสอ่อนๆ ซึ่งทราบได้จากกระบวนการทำยางดัดแปรให้บริสุทธิ์ โดยมีค่าพีเอชประมาณ 7.4-7.6 และเมื่อในสูตรยางผสมมีสัดส่วนของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นความเป็นเบสของยางผสมจึงเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่า scorch time และ cure time ลดลง

ตารางที่ 4.7 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ ONR-2.63R

สัดส่วนของยาง ONR-2.63R (phr)	scorch time (s)	cure time (s)
0	252	450
10	249	387
20	235	372
40	220	361
60	213	311
80	184	297



รูปที่ 4.17 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร ONR-2.63R

#### 4.2.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ดัดแปร ONR-2.63R

หลังจากขึ้นรูปยางผสมแล้วนำตัวอย่างยางที่ได้แต่ละสูตรไปทำการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างยางทั้งก่อนและหลังการป่มเร่ง (aging) ดังนี้

##### 4.2.2.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมก่อนการป่มเร่ง

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (modulus at 300 % elongation) แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.18-4.20 พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มมากขึ้น โดยให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อสัดส่วนในสูตรยางผสม 20 phr โดยมีค่าเท่ากับ 22.70 MPa หลังจากนั้นเมื่อสัดส่วนของยาง ONR-2.63R เพิ่มมากขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง เช่นเดียวกันค่าระยะยืด ณ จุดขาดและค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น แต่ให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้ยาง ONR-2.63R เท่ากับ 40 phr โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 758% และ 3.50 MPa ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง ONR-2.63R ก่อนการป่มเร่ง

NR/ONR-2.63R	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
100:0	2.56 ± 0.12	17.91 ± 1.23	607 ± 34
90:10	2.61 ± 0.06	20.60 ± 1.57	616 ± 65
80:20	3.23 ± 0.07	22.70 ± 1.45	637 ± 106
60:40	3.50 ± 0.06	17.83 ± 1.44	758 ± 59
40:60	3.04 ± 0.05	17.92 ± 1.28	619 ± 84
20:80	2.59 ± 0.06	20.85 ± 1.23	696 ± 29

#### 4.2.2.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมหลังการบ่มเร่ง

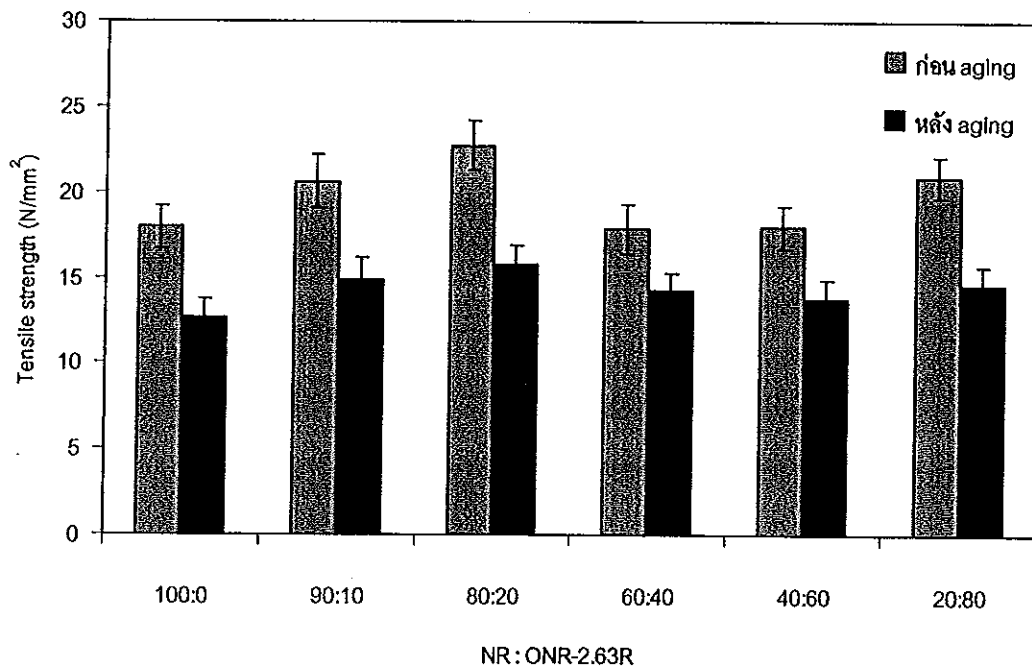
เมื่อนำยางผสมไปทำการบ่มเร่งและทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (modulus at 300 % elongation) แสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.18-4.20

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.18-4.20 พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และ ค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ หลังจากผ่านการบ่มเร่งมีค่าลดลง โดยสูตรที่สามารถทนต่อการบ่มเร่งได้ดีที่สุดคือ ยางผสมสูตรที่มีปริมาณของยาง ONR-2.63R 20 phr สำหรับค่าความทนต่อแรงดึง และ 40 phr สำหรับค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุการลดลงของสมบัติความทนต่อแรงดึงเมื่อขึ้นตัวอย่างยางผสมผ่านการบ่มเร่งเพราะการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางชนิดต่างๆ นั้น จะเกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างพร้อมๆ กันคือ เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) และเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล แต่ในกรณีของยางธรรมชาติการขาดของสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลและเกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก (polysulfidic) ซึ่งสามารถถูกทำลายได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงและมีออกซิเจน ทำให้ความแข็งแรงและความเป็นนิลาสติกของยางผสมที่ผ่านการบ่มเร่งลดลงด้วย (Sirisinha, 2004)

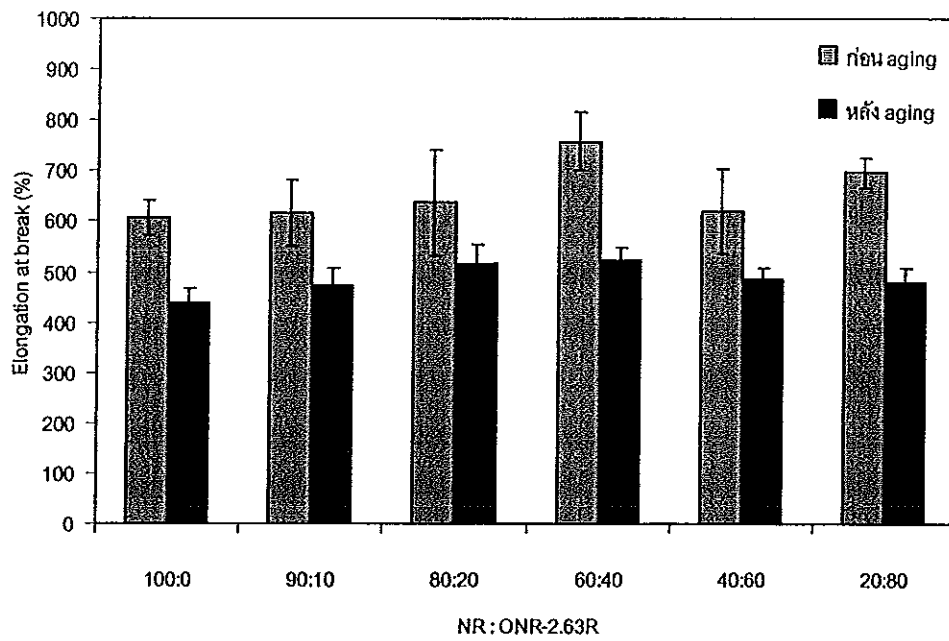
ส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และ ค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ แสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.21 พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในการทำนองเดียวกันคือเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นจนถึง 20 phr และหลังจากนั้นลดลงเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นอีก อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง ONR-2.63R ทำให้อยางผสมมีความทนต่อการบ่มเร่งได้ดีขึ้น แต่สมบัติความทนต่อแรงดึงลดลง

ตารางที่ 4.9 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง NR-2.63R หลังการบ่มเร่ง

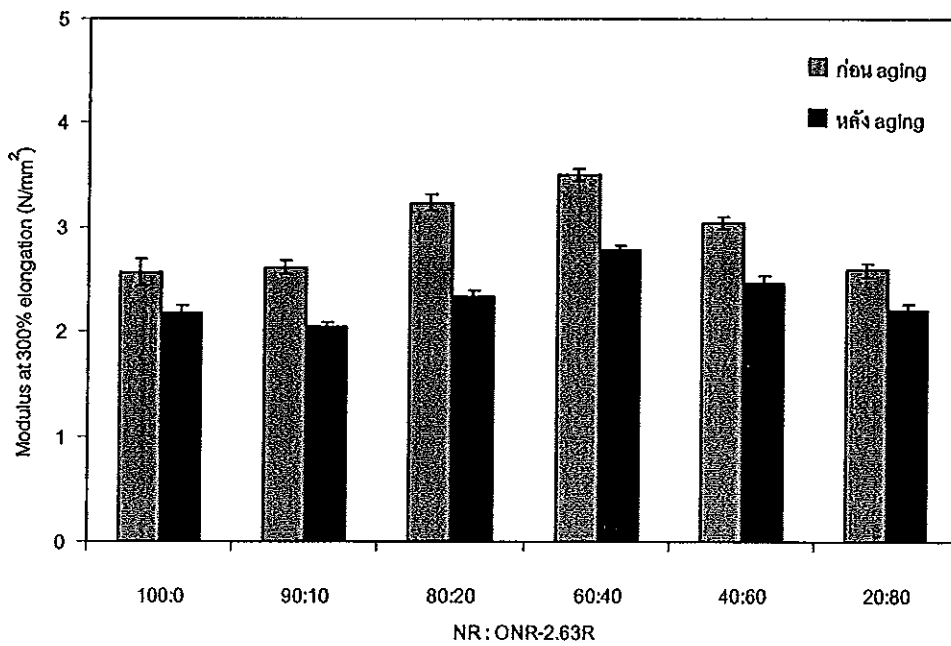
NR:ONR-2.63R	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
100:0	2.17 ± 0.08	12.68 ± 1.02	439 ± 30
90:10	2.04 ± 0.05	14.86 ± 1.33	475 ± 35
80:20	2.33 ± 0.07	15.76 ± 1.13	517 ± 37
60:40	2.78 ± 0.05	14.24 ± 0.99	525 ± 24
40:60	2.46 ± 0.08	13.79 ± 1.03	488 ± 20
20:80	2.21 ± 0.06	14.58 ± 1.04	479 ± 28



รูปที่ 4.18 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง NR-2.63R ที่สัดส่วนแตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 ระยะเวลายืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง ONR-2.63R ที่สัดส่วนแตกต่างกัน

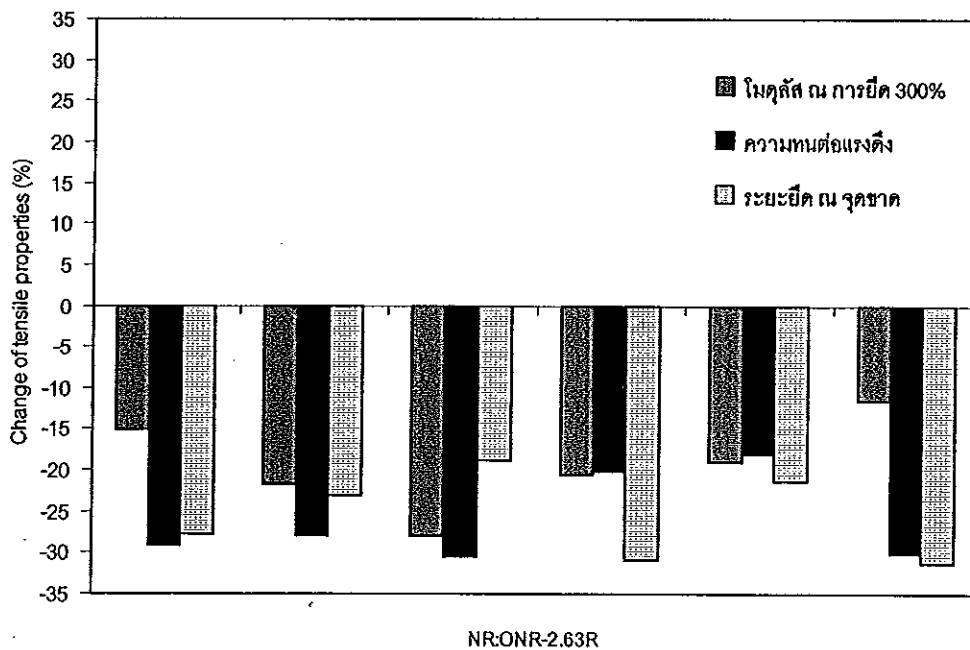


รูปที่ 4.20 มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง ONR-2.63R ที่สัดส่วนแตกต่างกัน



ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง  
ยางธรรมชาติกับยาง NR-2.63R หลังผ่านการป้อนแรง

NR:ONR-2.63R	การเปลี่ยนแปลง (%)		
	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์	ความทนต่อแรงดึง	ระยะยืด ณ จุดขาด
100:0	-15.2	-29.2	-27.7
90:10	-21.8	-27.9	-23.1
80:20	-27.9	-30.6	-18.8
60:40	-20.6	-20.1	-30.9
40:60	-19.1	-18.1	-21.3
20:80	-11.6	-30.1	-31.2



รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่าง  
ยางธรรมชาติกับยาง NR-2.63R หลังผ่านการป้อนแรง

#### 4.2.3 การทดสอบการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R

การทดสอบการทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายของยางผสม โดยการวัดค่าการบวมตัวเปรียบเทียบแต่ละสูตรทั้งก่อนและหลังการปมเร่ง ผลการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันซีลิโคนแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.22 ส่วนผลการบวมตัวในโทลูอีนแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.23 และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการบวมตัวในน้ำมันซีลิโคนและโทลูอีนแสดงในรูปที่ 4.24 จากตารางและรูปพบว่าปริมาณการบวมตัวของยางผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นทั้งในน้ำมันซีลิโคนและโทลูอีนเนื่องจากผลการทดสอบหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ายางชนิดนี้มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอนิล (C=O) ในโครงสร้างซึ่งมีความเป็นขั้วแตกต่างจากน้ำมันซีลิโคนและโทลูอีน ทำให้การบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นในสูตรยางผสม ส่วนผลการบวมตัวหลังจากยางผ่านการปมเร่งพบว่า ปริมาณการบวมตัวมีค่าสูงกว่าก่อนการปมเร่งทุกสูตรและทุกอัตราส่วนทั้งในน้ำมันซีลิโคนและโทลูอีนเช่นเดียวกัน สาเหตุที่ปริมาณการบวมตัวหลังการปมเร่งมีค่าสูงกว่าก่อนการปมเร่งเนื่องจากในการปมเร่งด้วยความร้อนทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงภายในระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อยลง จึงสามารถดูดน้ำมันซีลิโคนและโทลูอีนได้มากกว่ายางก่อนนำมาผ่านการปมเร่งปริมาณการบวมตัวจึงมากกว่า

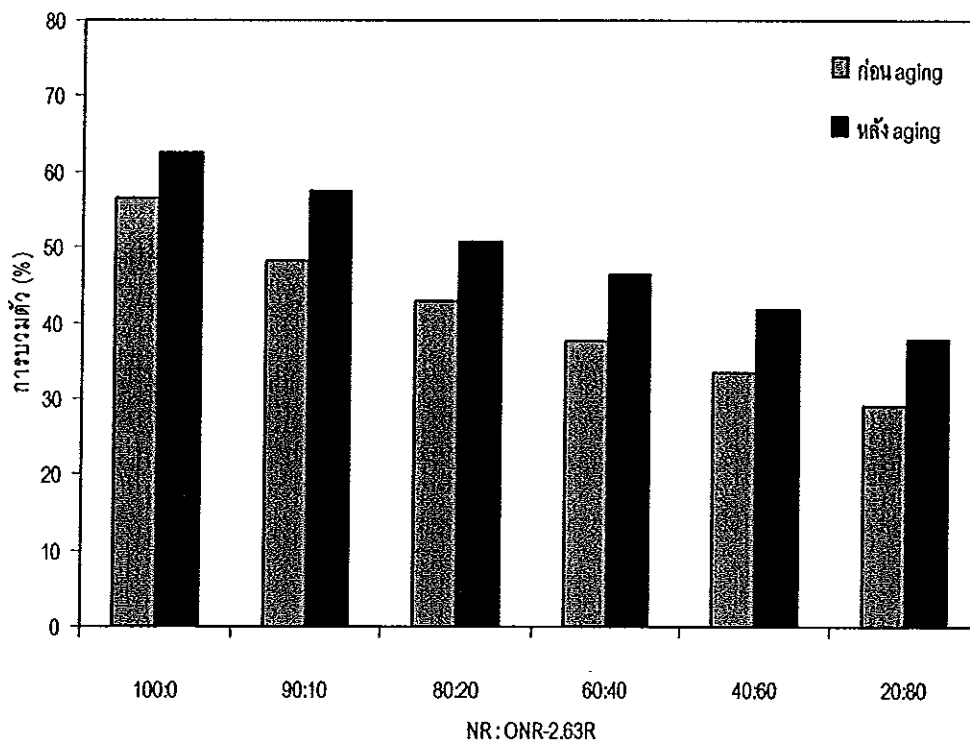
ส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการบวมตัวหลังจากการปมเร่ง เมื่อนำยางผสมผ่านการปมเร่งแล้วนำมาทดสอบ (รูปที่ 4.24) พบว่ายางผสมทนต่อน้ำมันซีลิโคนได้น้อยลงเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มมากขึ้น ส่วนการแช่ในโทลูอีนพบว่าสามารถทนต่อการปมเร่งได้มากขึ้นเมื่อในสูตรยางผสมมียาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.11 การบวมตัวในน้ำมันซีลิโคนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R

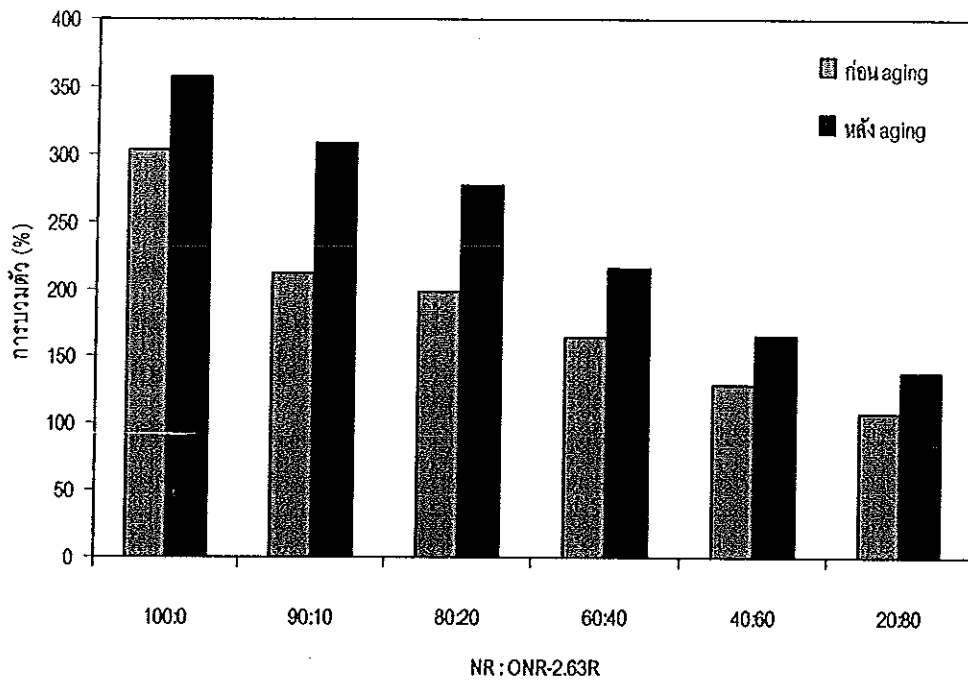
NR:ONR-2.63R	ก่อนการปมเร่ง (%)	หลังการปมเร่ง (%)	การเปลี่ยนแปลงการบวมตัว (%)
100:0	56.38	62.54	10.93
90:10	48.23	57.51	19.24
80:20	42.79	50.64	18.35
60:40	37.58	46.38	23.42
40:60	33.47	41.82	24.95
20:80	29.16	37.83	29.73

ตารางที่ 4.12 การบวมตัวในโพลูอีของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง NR-2.63R

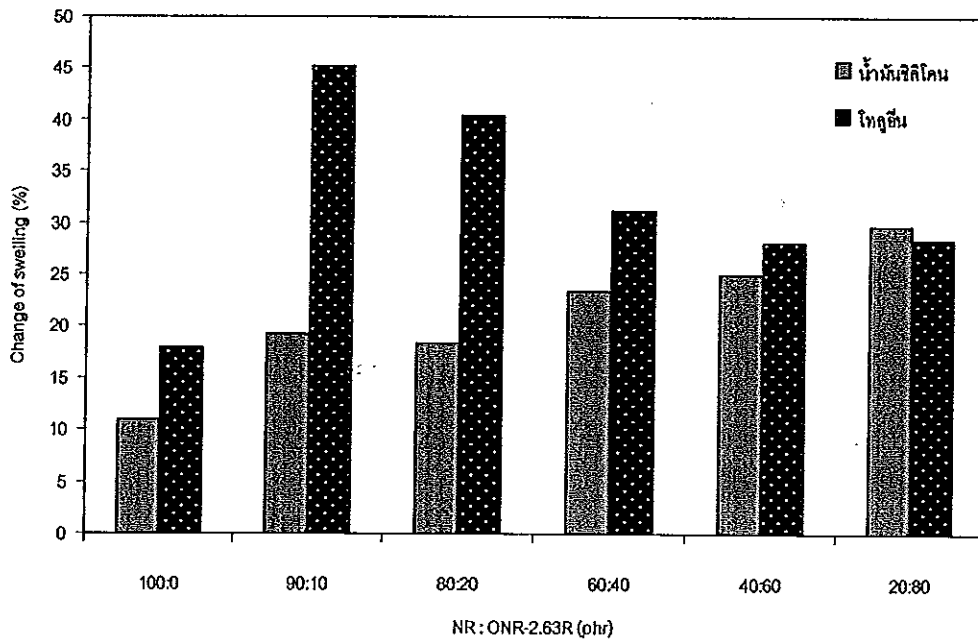
NR:ONR-2.63R	ก่อนการปมเร่ง (%)	หลังการปมเร่ง (%)	การเปลี่ยนแปลงการบวมตัว (%)
100:0	302.94	357.43	17.98
90:10	212.16	308.12	45.23
80:20	197.68	277.63	40.44
60:40	164.43	215.64	31.14
40:60	128.87	164.96	28.01
20:80	107.68	138.21	28.35



รูปที่ 4.22 การบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง NR-2.63R



รูปที่ 4.23 การบวมตัวในโพลูอีของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการบวมตัวของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ONR-2.63R หลังผ่านการปมเร่ง

### 4.3 การนำยาง ONR-2.63R ไปใช้ในรูปแบบของสารช่วยผสม (compatibilizer) ในการผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับ ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (ENR-50)

#### 4.3.1 ผลการผสมยาง NR กับ ENR-50 ในสัดส่วนแตกต่างกันโดยปราศจากการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม

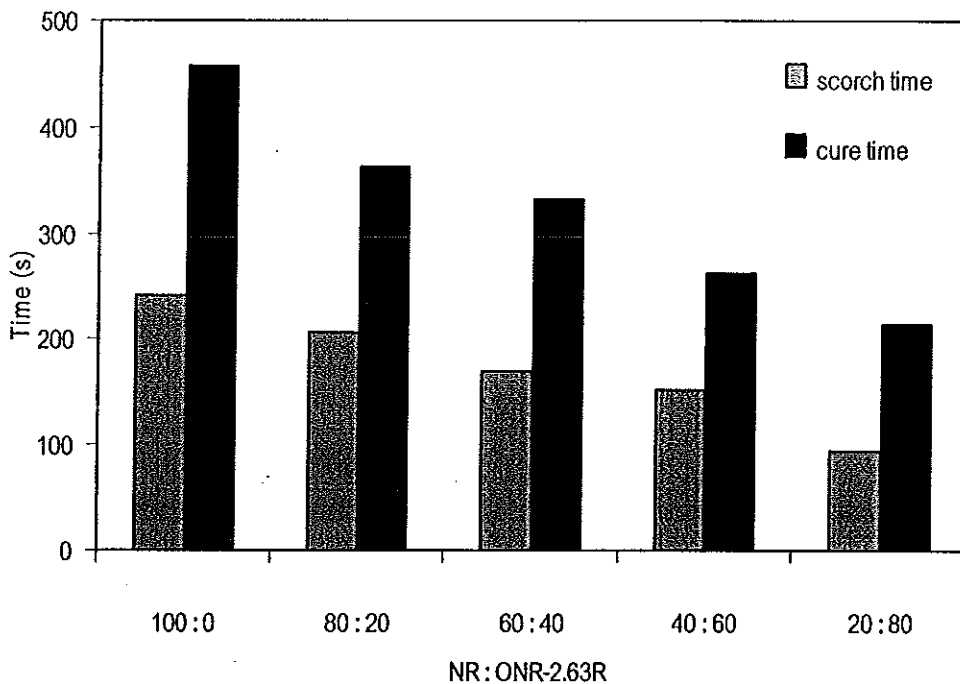
การทดสอบนี้เพื่อนำสูตรยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 ที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงดีที่สุดไปทำการทดสอบผลของการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมต่อไป โดยผลการทดสอบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

##### 4.3.1.1 ผลการทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์

ผลการทดสอบหาค่า scorch time และ cure time ของยางผสมแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.25 จากรูปและตารางพบว่า ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยาง ENR-50 ในสูตรยางผสมเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.13 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50

สัดส่วนยาง NR : ENR-50	scorch time (s)	cure time (s)
100 : 0	241	458
80 : 20	207	362
60 : 40	169	333
40 : 60	152	262
20 : 80	95	215



รูปที่ 4.25 scorch time และ cure time ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50

#### 4.3.1.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50

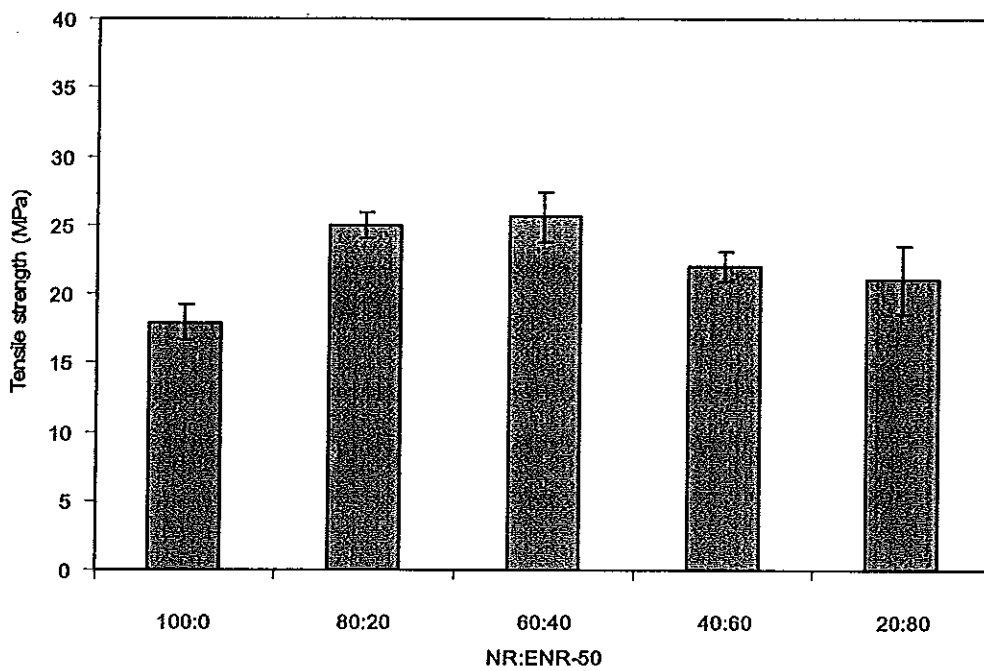
ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 ในสัดส่วนแตกต่างกัน ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ แสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.26-4.28

จากรูปและตารางพบว่า ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ค่าทั้ง 3 ดังกล่าวสูงขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ENR-50 ในสูตรยางผสมเพิ่มขึ้น และให้ค่าสูงสุดที่ปริมาณยาง ENR-50 เท่ากับ 40 phr หลังจากนั้นมามีค่าลดลง โดยค่าความทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 25.61 และ 3.31 MPa ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงสุดเท่ากับ 720%

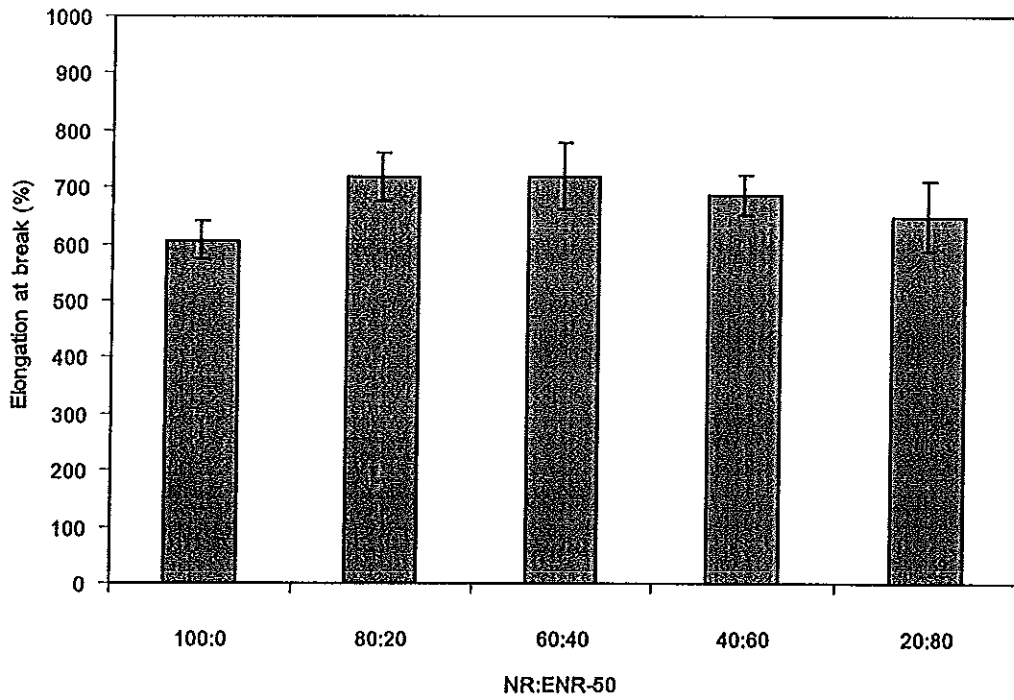
จากผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 สามารถสรุปได้ว่า สูตรยางผสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบผลของการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมคือ ยางที่มีสัดส่วนของยาง NR:ENR-50 เท่ากับ 60:40

ตารางที่ 4.14 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยาง ENR-50

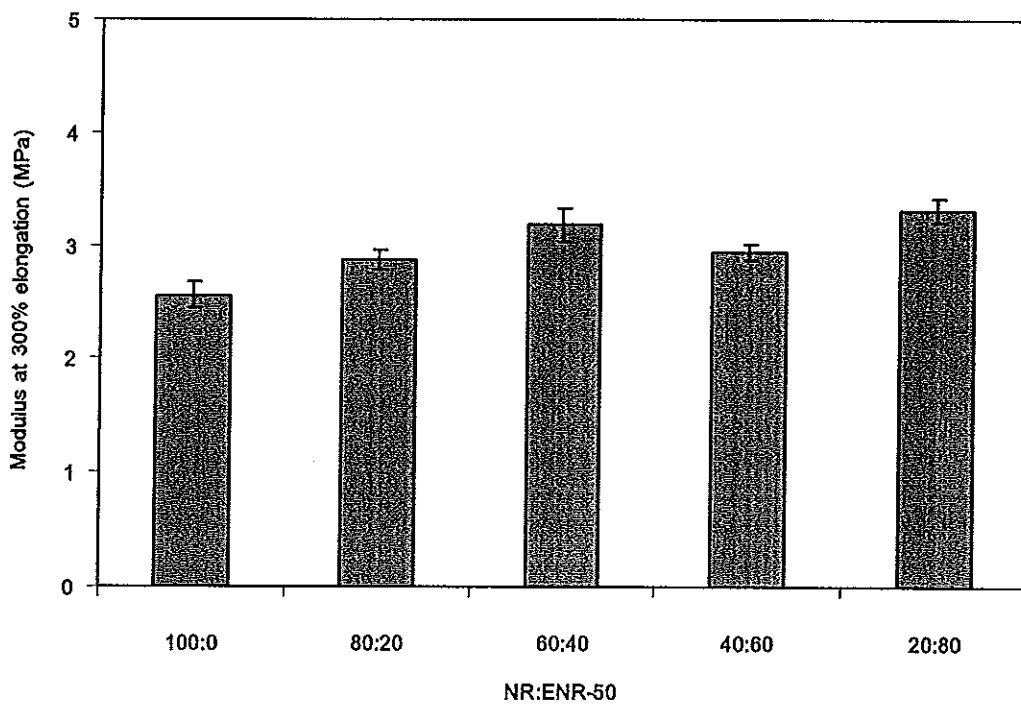
สัดส่วนของยาง NR : ENR	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
100 : 0	2.56 ± 0.12	17.91 ± 1.23	607 ± 34
80 : 20	2.87 ± 0.09	24.95 ± 0.98	718 ± 43
60 : 40	3.18 ± 0.15	25.61 ± 1.79	720 ± 57
40 : 60	2.94 ± 0.07	22.05 ± 1.06	687 ± 36
20 : 80	3.31 ± 0.10	21.02 ± 2.45	649 ± 61



รูปที่ 4.26 ค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50



รูปที่ 4.27 ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50



รูปที่ 4.28 ค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50



#### 4.3.2 การประยุกต์ใช้งานยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50

สูตรยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 ที่นำมาใช้ในการทดสอบคือที่ สัดส่วน 60:40 โดยผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

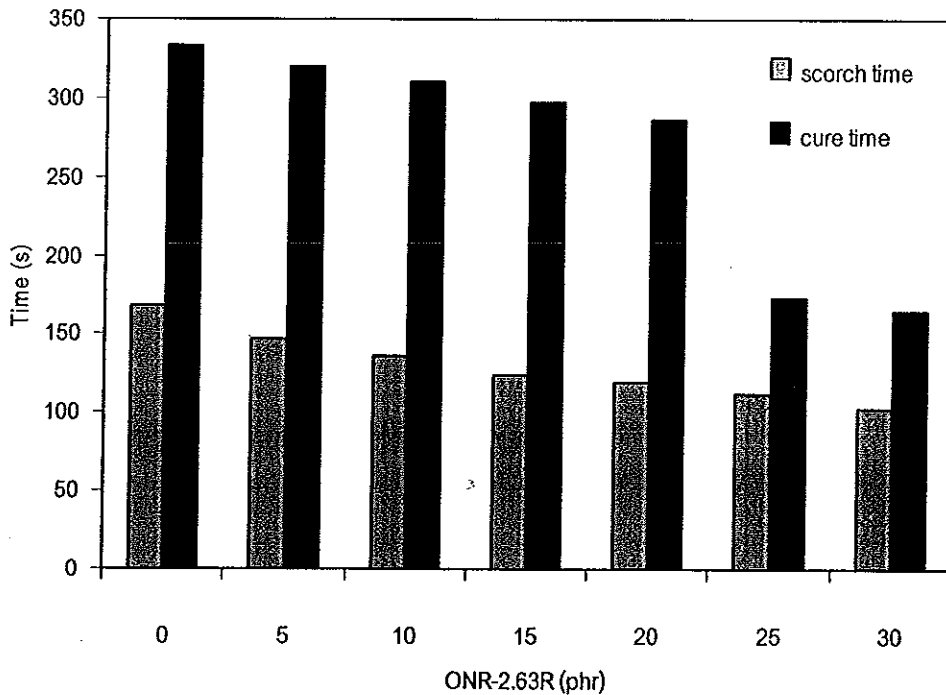
##### 4.3.2.1 การทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์

ผลการทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 ที่สัดส่วน 60:40 โดยมีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมที่สัดส่วนแตกต่างกันตั้งแต่ 0-30 phr แสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.29

จากตารางและรูปพบว่าเมื่อยางผสมมีการเติมยาง ONR-2.63R ในปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมมีค่าลดลง ซึ่งเหตุผลก็เหมือนที่กล่าวไว้ในผลการทดสอบข้อ 4.2.1 คือ ถ้าในสูตรยางผสมมีการเติมสารที่มีความเป็นเบสลงไป สารนั้น จะทำให้ค่า scorch time และ cure time ลดลง (พรพรรณ, 2528) ซึ่งในสูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่ทดลองมีการเติมยาง ONR-2.63R ซึ่งมีความเป็นเบสลงไปทำให้ค่า scorch time และ cure time ลดลง

ตารางที่ 4.15 ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน

ปริมาณยาง ONR-2.63R (phr)	scorch time (s)	cure time (s)
0	169	333
5	147	320
10	136	311
15	124	298
20	119	287
25	112	173
30	103	165



รูปที่ 4.29 scorch time และ cure time ของยางผสมที่มีการเติมยาง NR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกัน

#### 4.3.2.2 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง NR-2.63R เป็นสารช่วยผสม

การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่สัดส่วน 60:40 โดยเติมยาง NR-2.63R เป็นสารช่วยผสม ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่าโมดูลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ทั้งก่อนและหลังการปมเร่ง มีดังนี้

##### 4.3.2.2.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมก่อนการปมเร่ง

จากตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.30-4.32 พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางผสมมีการเติมยาง NR-2.63R ในช่วง 0-10 phr และให้ค่าสูงสุดที่ 10 phr คือ 27.14 MPa หลังจากนั้นค่าความทนต่อแรงดึงลดลงเมื่อเติมยาง NR-2.63R เพิ่มมากขึ้น สาเหตุที่ทำให้ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติมยาง NR-2.63R ในปริมาณน้อยๆ เนื่องจากยาง NR-2.63R จะเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสของยางทั้งสอง (เฟสของยางธรรมชาติกับเฟสของยาง ENR-50) ทำให้แรงดึงผิวระหว่างเฟส (interfacial tension) มีค่าลดลง และทำให้แรงยึดติดระหว่างเฟส (interfacial strength) มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ยางผสมเข้ากันได้มากขึ้น เมื่อมีแรงมากระทำในขณะที่ดึงยืด แรงดังกล่าวจะถูกถ่ายเทจากเฟสของยางธรรมชาติไปยังเฟสของยาง ENR-50 ผ่านทางยาง NR-2.63R ทำใหยางผสมทนต่อ

แรงดึงได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของยาง ONR-2.63R มากขึ้น จะทำให้ยาง ONR-2.63R มากเกินไปที่เข้าไปอยู่ระหว่างเฟสของยางทั้งสอง ทำให้ส่วนที่เกินเกิดการรวมกันเป็นเฟสใหม่ขึ้นมา ซึ่งเฟสใหม่นี้จะทำให้ผิวระหว่างเฟสของยางธรรมชาติกับเฟสของยาง ENR-50 ลื่นหรือเป็นจุดอ่อนในยางผสม มีผลให้ยางผสมมีความทนต่อแรงดึงลดลง (Kiatkamjornwong and Pairpisit, 2004) หรืออาจเกิดจากสาเหตุที่ว่าเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นในสูตรของยางผสมทำให้ปริมาณยางรวมในสูตรยางผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารเคมีที่ใช้ในสูตรยางผสมมีค่าเท่าเดิม สัดส่วนของยางทั้งหมดกับสารเคมีจึงไม่เท่ากัน และเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R ยิ่งเพิ่มขึ้นสัดส่วนของยางรวมกับสารเคมีจะยิ่งมีค่าลดลง เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์ค่าความทนต่อแรงดึงจึงลดลงด้วย

ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางผสมพบว่ามีความใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก โดยให้ค่าสูงสุดในสูตรยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R ปริมาณ 20 phr มีค่าเท่ากับ 926% ซึ่งสาเหตุก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับค่าความทนต่อแรงดึง

ส่วนค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์พบว่าเมื่อยางผสมมีการเติมยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงซึ่งสาเหตุก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับค่าความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.16 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกันก่อนการบ่มเร่ง

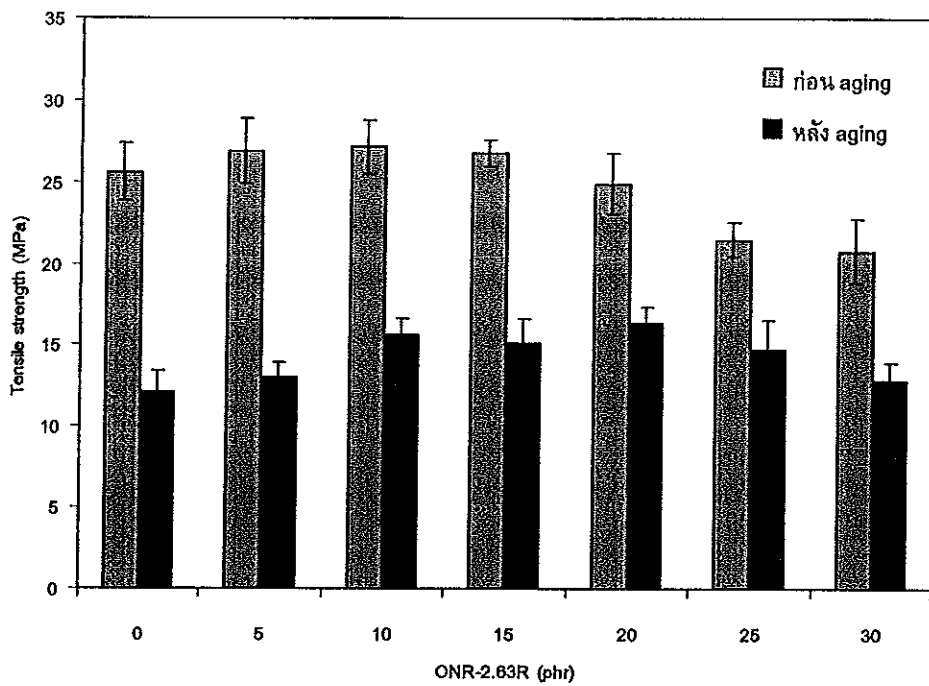
ปริมาณยาง ONR-2.63R (phr)	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
0	3.18 ± 0.15	25.61 ± 1.79	720 ± 57
5	2.57 ± 0.18	26.85 ± 2.02	791 ± 31
10	2.63 ± 0.09	27.14 ± 1.66	814 ± 76
15	2.68 ± 0.12	26.77 ± 0.84	843 ± 42
20	2.01 ± 0.06	24.89 ± 1.85	926 ± 28
25	1.74 ± 0.14	21.47 ± 1.06	884 ± 59
30	1.63 ± 0.12	20.79 ± 1.98	857 ± 37

#### 4.3.2.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมหลังการบ่มเร่ง

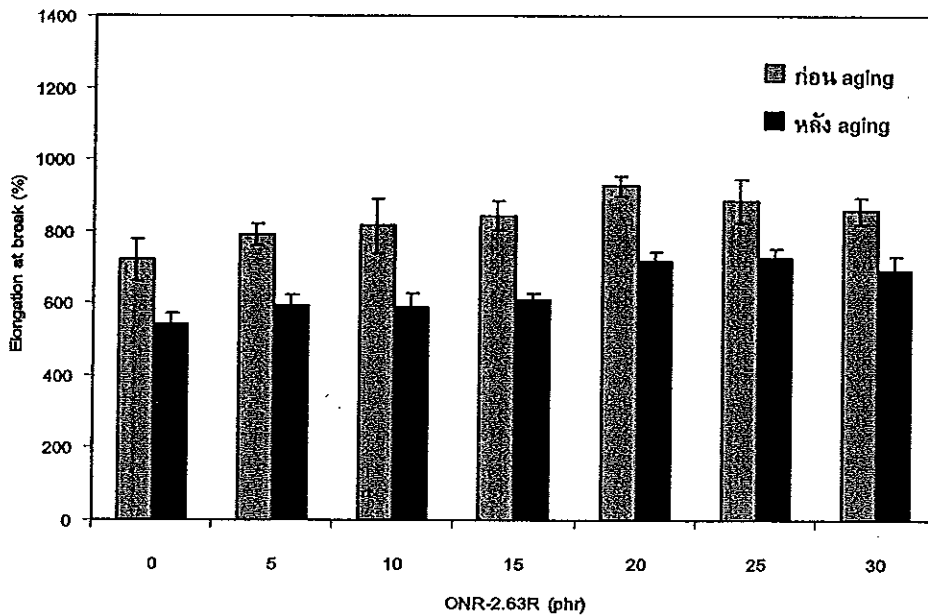
จากตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.30-4.32 พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่สัดส่วน 60:40 โดยเติมยาง ONR-2.63R ปริมาณแตกต่างกันเป็นสารช่วยผสมหลังผ่านการบ่มเร่งมีค่าลดลงเนื่องจากระบบวัลคาไนซ์ของยางผสมเป็นระบบปกติ (conventional) ซึ่งระบบนี้มีการเชื่อมโยงของพันธะแบบพอลิซัลไฟดิค (polysulfidic) เป็นส่วนใหญ่ประมาณ 70% ของการเชื่อมโยงทั้งหมด ส่วนการเชื่อมโยงแบบมอนอซัลไฟดิค (monosulfidic) และไดซัลไฟดิค (disulfidic) อีกชนิดละ 15% (พรพรรณ, 2528) ซึ่งการมีพันธะแบบพอลิซัลไฟดิคทำให้ยางผสมสามารถถูกทำลายได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงและมีออกซิเจน ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงและสมบัติความเป็นอีลาสติคของยางผสมมีค่าลดลง (Sirisinha, 2004) ส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ แสดงในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.33 พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาดมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น จึงเป็นไปได้ว่ายาง ONR-2.63R ทำให้ยางผสมมีสมบัติทนต่อการบ่มเร่งได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในสัดส่วนแตกต่างกันหลังการบ่มเร่ง

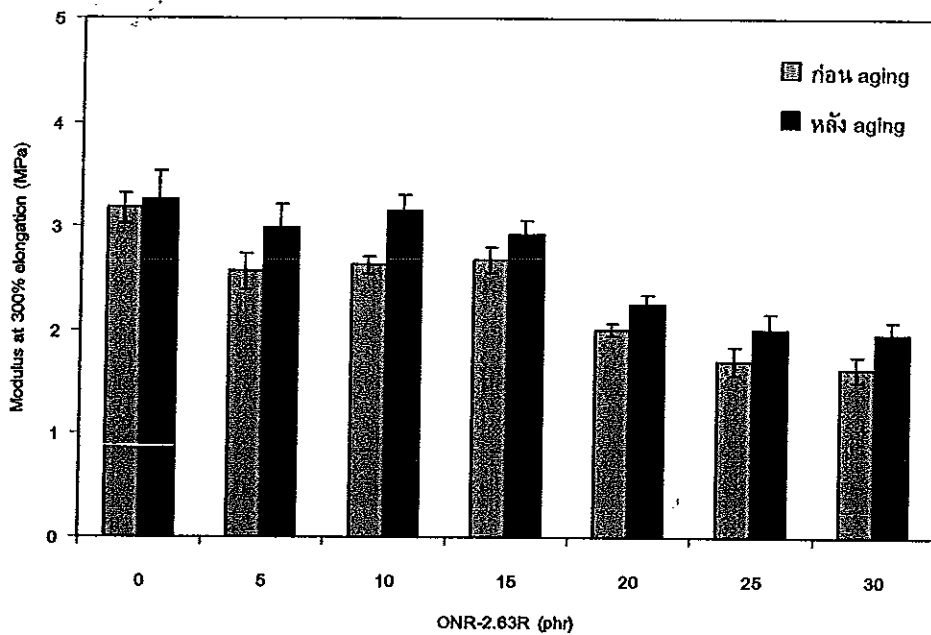
ปริมาณยาง ONR-2.63R (phr)	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
0	3.26 ± 0.28	12.15 ± 1.33	542 ± 28
5	2.99 ± 0.22	13.06 ± 0.86	592 ± 32
10	3.16 ± 0.15	15.62 ± 1.03	587 ± 41
15	2.93 ± 0.14	15.14 ± 1.54	610 ± 18
20	2.26 ± 0.09	16.39 ± 0.99	719 ± 26
25	2.01 ± 0.16	14.79 ± 1.78	727 ± 23
30	1.96 ± 0.13	12.84 ± 1.12	693 ± 37



รูปที่ 4.30 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่มีการเติมยาง ONR-2.63R ในปริมาณที่แตกต่างกัน



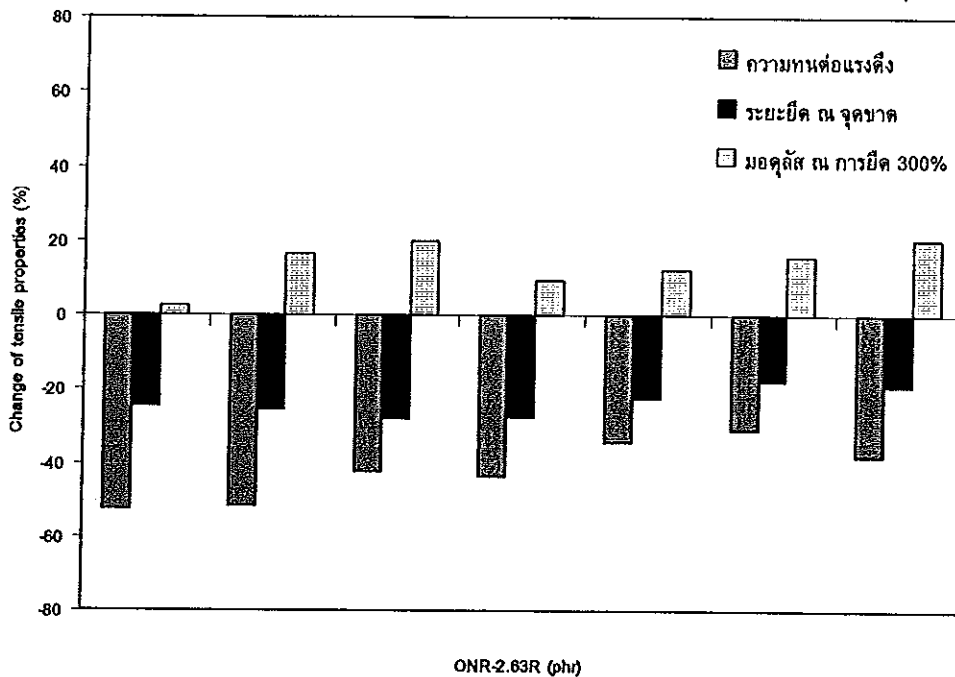
รูปที่ 4.31 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน



รูปที่ 4.32 มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่มีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม หลังผ่านการปมเร่ง

ONR-2.63R (phr)	การเปลี่ยนแปลง (%)		
	มอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์	ความทนต่อแรงดึง	ระยะยืด ณ จุดขาด
0	2.5	-52.6	-24.7
5	16.3	-51.5	-25.2
10	20.1	-42.4	-27.9
15	9.3	-43.5	-27.6
20	12.4	-34.2	-22.4
25	15.5	-31.1	-17.8
30	20.2	-38.2	-19.1



รูปที่ 4.33 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมหลังผ่านการปมเร่ง

#### 4.3.2.3 การทดสอบการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม

การบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยางผสมระหว่างยาง NR กับ ENR-50 ที่สัดส่วน 60:40 โดยมีการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.19-4.20 และรูปที่ 4.34-4.36

จากตารางและรูปพบว่า ปริมาณการบวมตัวของยางผสมทั้งในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R ที่เติมลงไปเพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง ONR-2.63R มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอนิล (C=O) ในโครงสร้าง อีกทั้งยาง ENR-50 ก็มีความเป็นขี้ จึงสามารถต้านทานต่อน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนได้ (เสาวนีย์, 2540) และเมื่อเติมยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นยางผสมก็มีความเป็นขี้เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การบวมตัวน้อยกว่าสูตรยางผสมที่มีปริมาณของยาง ONR-2.63R น้อยกว่า ส่วนผลการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยางผสมหลังจากผ่านการปมเร่งแล้วพบว่า ปริมาณการบวมตัวมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการปมเร่งด้วยความร้อนทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลภายใน

ยางผสมทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslinked density) มีค่าลดลง การบวมตัว จึงมีค่าเพิ่มขึ้น (Hideaki Tokuyama, 2007)

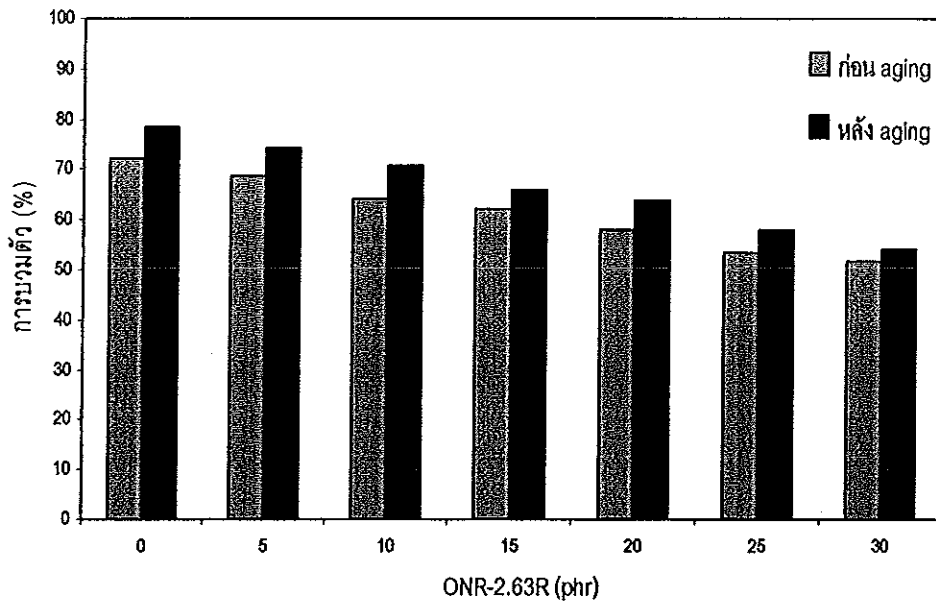
ตารางที่ 4.19 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน

ONR-2.63R (phr)	ก่อนการปมเร่ง (%)	หลังการปมเร่ง (%)	การเปลี่ยนแปลงการบวมตัว (%)
0	72.31	78.45	8.49
5	68.75	74.29	8.06
10	64.22	70.67	10.04
15	62.14	65.89	6.03
20	58.06	63.62	9.58
25	53.32	57.94	8.66
30	51.89	54.13	4.32

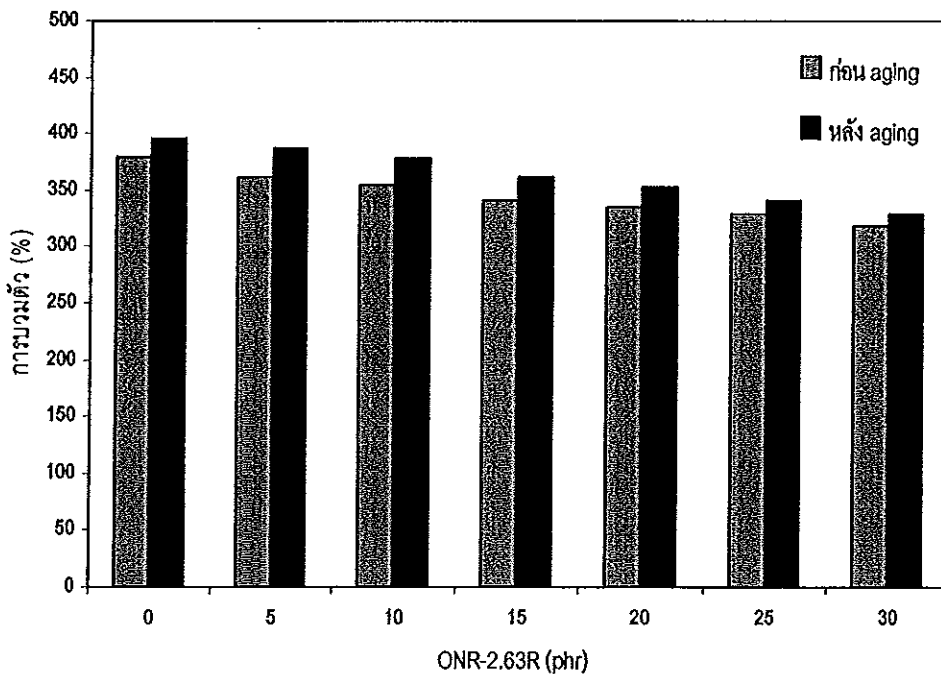
ตารางที่ 4.20 ปริมาณการบวมตัวในโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน

ONR-2.63R (phr)	ก่อนการปมเร่ง (%)	หลังการปมเร่ง (%)	การเปลี่ยนแปลงการบวมตัว (%)
0	378.93	395.82	4.46
5	362.14	387.61	7.03
10	354.12	377.94	6.73
15	340.46	361.42	6.15
20	335.21	353.10	5.34
25	327.16	340.88	4.19
30	318.73	329.36	3.34

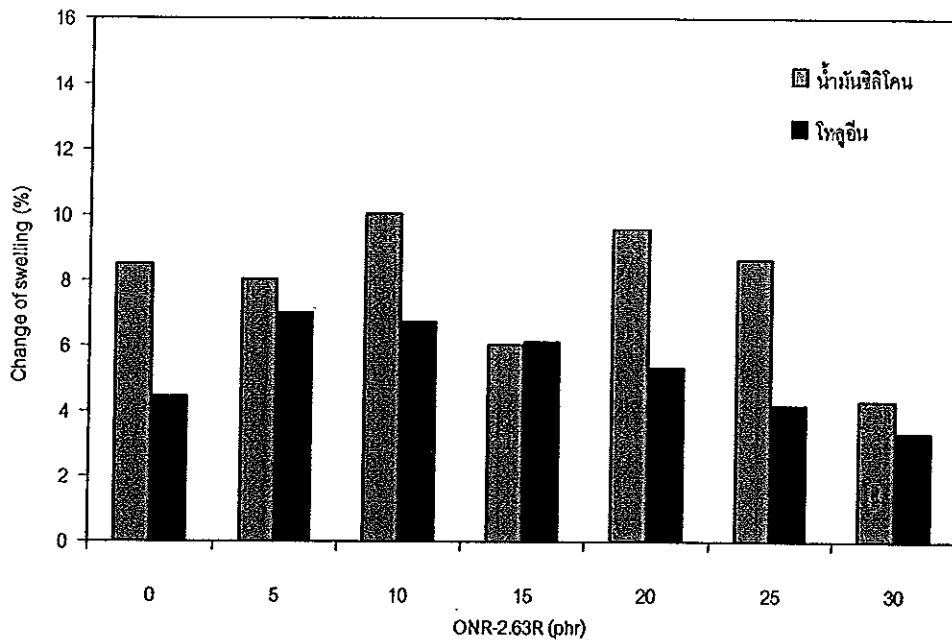




รูปที่ 4.34 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน



รูปที่ 4.35 ปริมาณการบวมตัวในโพลูอีทิลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน



รูปที่ 4.36 การเปลี่ยนแปลงการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 โดยเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ผลการเตรียมและทดสอบสมบัติของยางดัดแปร

จากผลการเตรียมและทดสอบสมบัติของยางดัดแปรสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างทางโมเลกุลของยางธรรมชาติหลังจากทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมเปอร์กาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) มีการเปลี่ยนแปลง โดยมีหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้น แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 หมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับ  $\text{KMnO}_4$

เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน
3,430	การยึดของพันธะ O-H
1,720	การยึดของพันธะ C=O

2. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  มีสองชนิดคือ ส่วนที่เป็นยางดัดแปรและส่วนที่เป็นของเหลวหนืด

3. น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ ) ของยางดัดแปรมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ที่ทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น

4. ปริมาณการบวมตัวในน้ำกลั่นของยางดัดแปรมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  ที่ทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น

5. ความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ของยางดัดแปรที่ได้จากการขึ้นรูปโดยการเทลงเข้ามีความแตกต่างกันไม่มากนักโดยให้ค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เท่ากับ 0.0263 g/100 g ของยางแห้ง สำหรับค่าความทนต่อแรงดึง และให้ค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของ  $\text{KMnO}_4$  เท่ากับ 0.0395 g/100 g ของยางแห้ง สำหรับระยะยืด ณ จุดขาด

### 5.1.2 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางดัดแปร ONR-2.63R

ผลจากการเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสม เมื่อนำยางดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับ  $\text{KMnO}_4$  ปริมาณ 0.0263 g/100 g ของยางแห้งหรือยาง ONR-2.63R ไปทำการผสมต่อกับยางธรรมชาติ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของยาง ONR-2.63R ในสูตรยางผสมเพิ่มมากขึ้น

2. ค่าความทนต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซนต์ เพิ่มขึ้นจนให้ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเมื่อสัดส่วนของยาง ONR-2.63R ในสูตรยางผสมเพิ่มมากขึ้น และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นอีก โดยค่าความทนต่อแรงดึงให้ค่าสูงสุดเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R เท่ากับ 20 phr ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซนต์ ให้ค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เท่ากับ 40 phr

3. ค่าความทนต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซนต์ มีค่าลดลงทุกสูตรและทุกอัตราส่วนหลังจากยางผสมผ่านการปมเร่ง

4. ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยางผสม มีค่าลดลงเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R ในสูตรยางผสมเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณการบวมตัวของยางผสมหลังจากผ่านการปมเร่งพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น

### 5.1.3 ผลการประยุกต์ใช้งานยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ระหว่างยาง NR กับ ENR-50

ผลจากการนำยางดัดแปร ONR-2.63R ไปประยุกต์ใช้งานเป็นสารช่วยผสม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สัดส่วนของยาง NR กับ ENR-50 ที่ใช้เป็นสูตรมาตรฐานในการนำไปทดสอบผลของการเติมยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมคือสัดส่วน 60:40 เพราะมีสมบัติความทนต่อแรงดึงดีที่สุด

2. ค่า scorch time และ cure time ของยางผสมเมื่อเติมยาง ONR-2.63R ในปริมาณแตกต่างกัน มีค่าลดลงเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น

3. ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R อยู่ในช่วง 0 – 10 phr และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้นอีก ส่วนความทนต่อแรงดึงหลังจากยางผ่านการปมเร่งพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมียาง ONR-2.63R ในสูตร

ยางผสมมากขึ้น จึงอาจเป็นไปได้ว่ายางชนิดนี้ทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงหลังจากการปมเร่งของยางผสมดีขึ้น

4. ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสมมีความใกล้เคียงกันแต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น ส่วนหลังผ่านการปมเร่งสูตรยางผสมที่มีปริมาณของยาง ONR-2.63R มากขึ้นจะมีค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

5. ค่ามอดุลัส ณ การยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของยาง ONR-2.63R เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางผสมผ่านการปมเร่งทุกสูตรและทุกอัตราส่วน

6. ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันซิลิโคนและโทลูอีนของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยาง ONR-2.63R ในสูตรยางผสมเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อยางผสมผ่านการปมเร่งทุกสูตรและทุกอัตราส่วน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองผสมยางชนิดอื่นที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกัน โดยใช้ยาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมแล้วทำการเปรียบเทียบผลกับสารช่วยผสมชนิดอื่นที่มีในทางการค้า

2. ในกระบวนการทำยางดัดแปรให้บริสุทธิ์ ควรกำจัดตะกอนสีน้ำตาลดำออกจากยางให้หมดเพราะส่งผลต่อสมบัติของยางดัดแปรเป็นอย่างมาก

3. ควรนำตัวอย่างยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ENR-50 ที่ไม่มีการเติมและมีการเติมยางดัดแปร ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมไปทดสอบด้วยเทคนิค SEM เพื่อศึกษาความแตกต่างของความเข้ากันได้ของยางผสมเมื่อมีการเติมยางดัดแปร ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสม

### บรรณานุกรม

- กฤษณา คงศิลป์. 2526. สารเคมีประกอบยาง. 123. งานอุตสาหกรรมยาง ศูนย์วิจัยยาง สงขลา.
- เกสร พะลัง. 2541. เคมีอินทรีย์ พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. หน้า 203-207.
- ชัชชาติ เทพรานนท์. 2532. ปฏิบัติการเคมีอินทรีย์พื้นฐาน. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- บุญธรรม นิธิอุทัย พรพรรณ นิธิอุทัย และ ปรีชา ป็องภัย. 2534. เทคโนโลยีน้ำยางข้น. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุญธรรม นิธิอุทัย. 2532. ปฏิบัติการเทคโนโลยีน้ำยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงาน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. ยาง-เทคนิคการออกสูตรยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2523. วิทยาการขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับยางแห้ง. กรมวิชาการเกษตร สงขลา.
- สมพงศ์ จันทรโพศรี. 2535. เคมีอินทรีย์ เล่ม 1. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ กรุงเทพมหานคร. หน้า 124-125.

โสภา อิศระ. 2545. การพัฒนาการผลิตยางธรรมชาติโดยเทคนิคการลดน้ำหนักโมเลกุล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2540. ยางธรรมชาติเบื้องต้น. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

Asaetha, R. and Thomas, Sabu. (1995). The technological compatibilization of natural rubber/polystyrene blends by the addition of natural rubber-graft-polystyrene. *Rubber Chemistry and Technology* 68, 671-687.

Bolland, J.L. and Hughes, H. (1949). The primary thermal oxidation product of squalene. *Journal of Chemistry Society*, 492.

Blow, C.M. (1975). *Rubber technology and manufacture*. 2<sup>nd</sup> ed. UK : Cox & Wyman, Fakenham, Norfolk.

Chindaprasert, S. (1997). Further to apply phase transfer technique for surface characterization of non-crosslinked natural rubber latex. *M.Sc. Thesis*. Mahidol university, Bangkok.

Derouet, D., Morvan, F. and Brosse, J.C. (2001). Chemical modification of 1,4-polydienes by di(alkyl or aryl)phosphates. *Eur. Polym. J.* 37, 1297-1313.

d'Auzac, J., Jacob, J.L. and Chrestin, H. (editors). (1989). *Physiology of Rubber Tree Latex*. CRD Press, Florida.

El-Sabbagh, S.H. (2003). Compatibility study of natural rubber and ethylene propylene diene rubber blends. *Polymer Testing* 22, 93-100.

Fred, W. Barlow. (1988). *Rubber compounding*. 1<sup>st</sup> ed. New York : Marcel Dekker, Inc.

- Ismail, H. and Leong, H.C. (2001). Curing characteristics and mechanical properties of natural rubber/chloroprene rubber and epoxidized natural rubber/chloroprene rubber blends. *Polymer Testing* 20, 509-516.
- Jansen, P. and Soares, G. (1996). Effect of compatibilizer and curing system on the thermal degradation of natural rubber/EVA copolymer blends. *Polymer Degradation and Stability* 52, 95-99.
- Kuhakarn, S. (1995). A study to characterize surface structure of uncrosslinked rubber particles in natural rubber latex by phase transfer technique. *M.Sc. Thesis*. Mahidol university, Bangkok.
- Kiatkamjornwong, S. and Pairisit, K. (2004). Natural rubber/ethylene propylene diene blends for high insulation iron crossarms. *Journal of Applied Polymer Science* 92, 3401-3416.
- Lehrle, R.S. and Willist, S.L. (1997). Modification of natural rubber: a study to assess the effect of vinyl acetate on the efficiency of grafting methyl methacrylate on rubber in latex form, in the presence of azo-bis-isobutyronitrile. *Polymer* 38, 5937-5946.
- Morton, M. (1987). *Rubber technology*. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Mukhopadhyay, S and De, S.K. (1991). Self-vulcanizable rubber blend based on neoprene and carboxylated nitrile rubber : Effect of blend ratio on miscibility and physical properties. *Journal of Applied Polymer Science* 43, 2283-2293.
- Mirzan, T., Razzak, Tabata, Y. and Otsuhata, K. (1993). Modification of natural rubber by different grafting techniques. *Radiation Physics and Chemistry* 42, 57-60.
- Mercangoz, M., Kusefoglu, S., Akmn, U. and Hortacsu, O. (2003). Polymerization of soybean oil via permanganate oxidation with sub/supercritical CO<sub>2</sub>. *Chemical Engineering and Processing* 43, 1015-1027.



- Nor, H.M. and Ebdon, J.R. (2000). Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution Part 1. A study by GPC and FTIR spectroscopy. *Polymer* 41, 2359-2365.
- Nakason, C., Kaesaman, A. and Supasanthitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. *Polymer Testing* 23, 35-41.
- Nakason, C., Tobprakhon, A. and Kaesaman, A. (2005). Thermoplastic vulcanizates based on poly(methyl methacrylate)/epoxidized natural rubber blends: Mechanical, thermal, and morphological properties. *Journal of Applied Polymer Science* 98, 1251-1261.
- Nakason, C. and Sahakaro, K. (2008). Thermoplastic natural rubber based on oil extended NR and HDPE blends: Blend compatibilizer, phase inversion. composition and mechanical properties. *Polymer Testing*.
- Okwu, U.N. and Okieimen, F.E. (1999). Properties of formic acid crosslinked epoxidised natural rubber (FC-ENR) blends with dry natural rubber. *European Polymer Journal* 35, 1855-1859.
- Okwu, U.N. and Okieimen, F.E. (2001). Preparation and properties of thloglycollic acid modified epoxidised natural rubber and its blends with natural rubber. *European Polymer Journal* 37, 2253-2258.
- Poh, B.T. and Lim, A.L. (2008). Adhesion properties of pressure-sensitive adhesives prepared from SMR 10/ENR 25, SMR 10/ENR 50, and ENR 25/ENR 50 blends. *Journal of Applied Polymer Science* 109, 115-119.
- Roff, W.J. and Scott, J.R. (1971). *Fiber, plastics and rubbers*. 1<sup>st</sup> ed. London: Butterworths.
- Sirisinha, C., Saeoui, P. and Guaysomboon, J. (2004). Oil and thermal aging resistance in Compatibilized and thermally stabilized chlorinated polyethylene/natural rubber Blends. *Polymer* 45, 4909-4916.

- Tangboriboonrat, P. (1991). Contribution a l'Etude du Latex de Caoutchouc Naturel par Transfert de Phase. *Ph.D Thesis*, Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France.
- Tangboriboonrat, P., Suchiva, K. and Kuhakarn, S. (1994). Characterization of non-crosslinked natural rubber latex by phase transfer technique. *Polymer* 35, 5144.
- Tangboriboonrat, P., Suchiva, K. and Riess, G. (1995). Surface characterization of a gamma-radiation crosslinked natural rubber latex by a phase transfer technique with cationic surfactants. *Polymer* 36, 781.
- Tangboriboonrat, P., Tiyaiboonchaiya, C. and Lerthittrakui, C. (1998). New evidence of the surface morphology of deproteinized natural rubber particle. *Polym. Bull* 41, 601.
- Tinker, Andrew A. and Jones, Kevin P. (1998). *Blend of Natural Rubber*. 1<sup>st</sup> ed. London : Chapman & Hall.
- Tangboriboonrat, P., Tanunchai, T. and Tiyaiboonchaiya, C. (1999). Creaming skim natural rubber latex for encapsulation of urea fertilizer. *Plast. Rubber Compos* 25, 357.
- Teh, P.L., Mohd Ishak, Z.A. and Hashim, A.S. (2004). Effects of epoxidized natural rubber as compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites. *European Polymer Journal* 40, 2513-2521.
- Tanrattanakul, V. and Petchkeaw, A. (2005). Mechanical properties and blend compatibility of natural rubber-chlorosulfonated polyethylene blends. *Journal of Applied Polymer Science* 99, 127-140.
- Tokuyama, H., Ishihara, N. and Sakohara, S. (2007). Effects of synthesis-solvent on swelling and elastic properties of poly(*N*-isopropylacrylamide) hydrogels. *European Polymer Journal* 43, 4975-4982.

**ภาคผนวก**

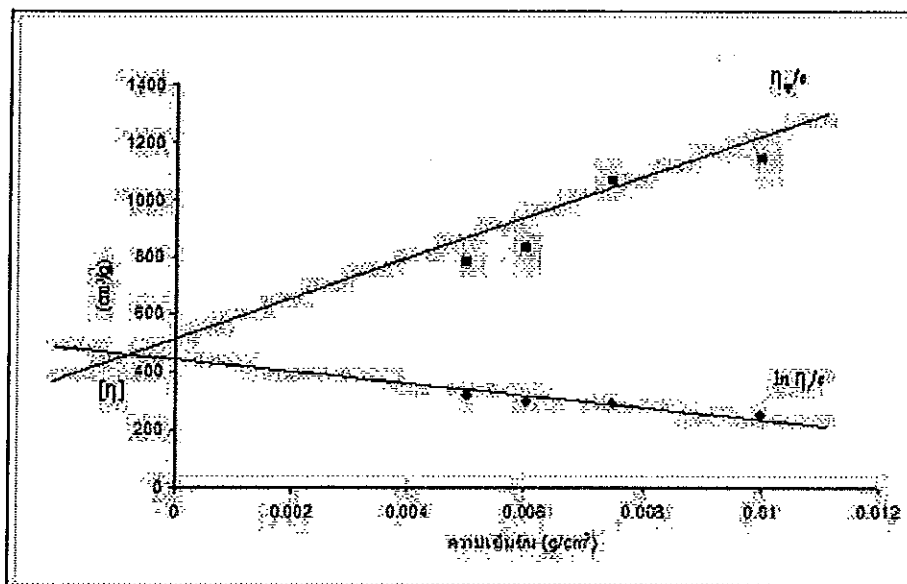
## ภาคผนวก ก

ผลการวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด ( $\bar{M}_v$ ) ของยางธรรมชาติ

การวัดค่า  $\bar{M}_v$  ของยางธรรมชาติ เมื่อทำการคำนวณค่า intrinsic viscosity ( $[\eta]$ ) มีค่าเท่ากับ 450 mL/g และเมื่อคำนวณเป็น  $\bar{M}_v$  มีค่าเท่ากับ 851,138 g/mol โดยค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ ก.1 และรูปที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่า  $\bar{M}_v$  ของยางธรรมชาติ

ความเข้มข้น(g/mL)	0.01	0.0075	0.0060	0.0050
flow time (s)	1,665	1,205	796	656
$\eta_r$	12.45	9.02	5.96	4.91
$\ln \eta_r/c$	252	293	297	318
$\eta_{sp}$	11.45	8.02	4.96	3.91
$\eta_{sp}/c$	1,145	1,069	826	782



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \eta_r/c$  กับ  $c$  และ  $\eta_{sp}/c$  กับ  $c$  ของยางธรรมชาติ

จากกราฟค่า  $[\eta]$  มีค่าประมาณ 450 mL/g

จากสมการ  $[\eta] = K\bar{M}_v^a$

เมื่อค่า  $K$  ของยางธรรมชาติเท่ากับ  $50.2 \times 10^{-3}$  mL/g

$a$  เท่ากับ 0.667

แทนค่าในสมการ  $450 = (50.2 \times 10^{-3}) \bar{M}_v^{0.667}$

$$\bar{M}_v = 10^{5.93} \text{ g/mol}$$

$$\bar{M}_v = 851,138 \text{ g/mol}$$

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันพืช

ตารางที่ ข.1 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันพืชของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางตัดแปร  
ONR-2.63R

สัดส่วนยาง NR : ONR-2.63R (phr)	ก่อนการปมเร่ง (%)	หลังการปมเร่ง (%)
100 : 0	56.38	62.54
90 : 10	48.23	57.51
80 : 20	42.79	50.64
60 : 40	37.58	46.38
40 : 60	33.47	41.82
20 ; 80	29.16	37.83

ตารางที่ ข.2 ปริมาณการบวมตัวในน้ำมันพืชของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ ENR-50  
โดยมียาง ONR-2.63R เป็นสารช่วยผสมในปริมาณแตกต่างกัน

ปริมาณยาง ONR-2.63R (phr)	ก่อนการปมเร่ง (%)	หลังการปมเร่ง
0	49.78	56.44
5	46.52	53.21
10	42.23	48.85
15	37.16	43.22
20	33.64	40.06
25	30.56	36.89
30	28.73	32.45

**ประวัติผู้เขียน**

ชื่อ สกุล	นายกิจวัตร แก้วแจ่มแจ้ง	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4622008	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546
(วิทยาศาสตรโพลีเมอร์)		