



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

**ปริญญา**

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของพลาสติกไซดไฟวีซีที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติและยางไนไตรล์

Effect of Plasticized Poly(vinyl chloride) on Properties of Natural Rubber and Nitrile Rubber

นามผู้วิจัย นางสาวโสพิศ ช่วยพันธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... อาจารย์สมเจตน์ พืชพันธ์, Dr.-Ing. ....)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... อาจารย์ฉันททิพ คำนวนทิพย์, Ph.D. ....)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิศิษฐ์ โฉมเจริญรัตน์, M.Eng. ....)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(..... รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. ....)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สืบสีตงี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของพลาสติกไซค์พีวีซีที่มีต่อสมบัติของ  
ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์

Effect of Plasticized Poly(vinyl chloride) on Properties  
of Natural Rubber and Nitrile Rubber

โดย

นางสาวโสพิศ ช่วยพันธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โสพิศ ช่วยพันธ์ 2553: อิทธิพลของพลาสติกไซค์พีวีซีที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ และยางไนไตรล์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing. 127 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพลาสติกไซค์พีวีซี (pPVC) ที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงานผลิตยางขอบกระจกรด โดยนำมาทำการบดย่อยให้มีลักษณะเป็นผง เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ (NR) และยางไนไตรล์ (NBR) เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตและต้นทุนในการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงาน รวมถึงความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง NR และ NBR โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติการไหลและการคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกายภาพในด้านต่างๆ สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกายภาพที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ความต้านทานการบวมพองในน้ำมัน ความต้านทานต่อการลามไฟ และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะ และสารเชื่อมประสาน ที่มีต่อสมบัติของยาง NR ที่การผสม pPVC 30 phr จากผลการทดสอบสมบัติการไหลพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC ในยาง NR และ NBR ส่งผลให้ความหนืดมูนนี้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ระยะเวลาในการคงรูปของยาง NBR มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของยาง NR และ NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กันพบว่า ความแข็ง และการบวมพองในน้ำมัน มีแนวโน้มดีขึ้น นอกจากนี้การผสม pPVC ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NBR และยาง NR ตามลำดับ หากพิจารณาสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพ พบว่ายาง NR และ NBR ที่ไม่ผสมสารตัวเติม pPVC มีสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมากภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยาง ในขณะที่ยาง NR และ NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ให้สมบัติการต้านทานการเสื่อมสภาพที่ดีกว่า ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการสลายตัวของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) และการเกิดปรากฏการณ์เจลเลชั่นของ pPVC นอกจากนี้จากผลการศึกษาอิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะและสารเชื่อมประสานที่มีต่อสมบัติของยาง NR+pPVC30 พบว่าการผสมยาง ENR ยาง CR และ MAH สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยาง NR กับสารตัวเติม pPVC ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน และความต้านทานต่อการลามไฟ รวมทั้งความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพมีแนวโน้มดีขึ้น

---

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sopit Chuypun 2010: Effect of Plasticized Poly(vinyl chloride) on Properties of Natural Rubber and Nitrile Rubber. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 127 pages.

In this study, the discarded plasticized poly(vinyl chloride) (pPVC) from extrusion of weather-seal was powdered and used as a filler for Natural Rubber (NR) and Nitrile Rubber (NBR). The effects of pPVC content on the rheological, mechanical and physical properties of rubber were studied in details. The rubber compounds and vulcanizates were characterized with respect to mooney viscosity, cure characteristic, tensile strength, hardness, compression set, abrasion, oil, and flame resistance, respectively. The effects of adding compatibilizer and coupling agent were also investigated. The results obtained from rheological tests indicated that the mooney viscosity of NR and NBR increased with the increasing amount of pPVC added. It was also found that the cure characteristic of NBR increased while the cure time of NR decreased as the increasing pPVC content. Considering the mechanical and physical properties of NR and NBR containing various pPVC contents, it was observed that the adding of pPVC improved the hardness and oil resistance of NR and NBR, including the tensile strength of NBR and flame resistance of NR, respectively. In addition to the thermal and ultraviolet resistance, it was found that the mechanical properties of unfilled NR and NBR decreased due to the desulphurization of the sulphur crosslinks and chain scission during heat and ultraviolet aging. It should be noted that the mechanical properties of the NR and NBR containing varying amount of pPVC were higher than that of unfilled NR and NBR. This was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer and the PVC gelation phenomenon during aging tests. Furthermore, the experimental results obtained from NR+pPVC30 filled with various content of ENR, CR, and MAH showed that the adding of ENR, CR, and MAH could improve the compatibility between NR and pPVC which led to an increase of abrasion, oil, flame, thermal, and ultraviolet resistances.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง และกรรมการที่ปรึกษาวิชารอง ดร. ฉันททิพ คำนวนทิตย์ และ ดร. อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณ นายสุทิน ทองคำ เจ้าหน้าที่กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

โสพิศ ช่วยพันธ์  
มกราคม 2553

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	82
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก อัตราส่วน โดยน้ำหนักของเขม่าดำใน pPVC	86
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติการคงรูป	88
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	91
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวเนื่องจากแรงอัด	107
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน	110
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟ	116
ภาคผนวก ช ผลงานทางวิชาการ	119
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	127

## สารบัญตาราง

ตารางผนวกที่		หน้า
1	อัตราส่วนระหว่างสารเร่งกับกำมะถันในระบบต่างๆ	8
2	สมบัติต่างๆ ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบต่างๆ	8
3	อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	21
4	สูตรยางสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติของยาง NR	25
5	สูตรยางสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติของยาง NBR	26
6	สูตรยางสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะยาง ENR ยาง CR และ MAH ต่อสมบัติของยาง NR ที่มี pPVC เป็นสารตัวเติม	26
7	ขั้นตอนและเวลาในการบดผสมยาง NR คอมปาวด์	27
8	ขั้นตอนและเวลาในการบดผสมยาง NBR คอมปาวด์	27
9	คุณสมบัติของเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A	34
10	ค่าความเหนียวนี้ และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ NR และ NBR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC ต่างๆ กัน	43
11	ค่าความแตกต่างแรงบิดของยางคอมปาวด์ NR และ NBR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC ต่างๆ กัน	43
12	ค่าความเหนียวนี้ และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	56
13	ค่าความเหนียวนี้ และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	57
14	ค่าความแตกต่างแรงบิดของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	58
15	ค่าความแตกต่างแรงบิดของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	58
16	สมบัติดีดต่างๆ ของการเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NR และ NBR	81

## ตารางผนวกที่

ข1	ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	89
ข2	ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	89
ข3	ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน	89

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข4	ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน	89
ข5	ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน	90
ค1	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ปริมาณ ต่างๆ กัน	92
ค2	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ปริมาณ ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	93
ค3	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ปริมาณ ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	94
ค4	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	95
ค5	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน เมื่อ ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	96
ค6	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน เมื่อ ผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	97
ค7	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน	98
ค8	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	99
ค9	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	100
ค10	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน	101
ค11	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	102
ค12	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กันเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	103
ค13	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน	104
ค14	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	105
ค15	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง1	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขูดฉีกเนื่องจากแรงอัดของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	108
ง2	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขูดฉีกเนื่องจากแรงอัดของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	109
จ1	ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	111
จ2	ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	112
จ3	ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน	113
จ4	ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน	114
จ5	ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน	115
ฉ1	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	117
ฉ2	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน	117
ฉ3	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน	117
ฉ4	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน	117
ฉ5	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน	118

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางขอบกระจกยนต์	2
2	โครงสร้างยางธรรมชาติแบบ cis-1,4-polyisoprene	4
3	โครงสร้างยาง NBR	5
4	ชนิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Type of sulfur crosslink)	7
5	สูตร โครงสร้างของ PVC	12
6	สูตร โครงสร้างของยาง ENR	13
7	สูตร โครงสร้างของยาง CR	14
8	สูตร โครงสร้าง MAH	16
9	เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง	17
10	เครื่องบดผสมระบบปิด	17
11	ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการคงรูป	19
12	ลักษณะยางคงรูปเกินจุดที่เหมาะสม	19
13	เครื่องบดย่อยเพื่อลดขนาดชิ้นงาน	22
14	เครื่องคัดแยกขนาด	23
15	(ก) ลักษณะของยางของกระจก pPVC และ (ข) ยางขอบกระจก pPVC เมื่อผ่านการบดย่อย	23
16	การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของ pPVC กับ CaCO <sub>3</sub> และเขม่าดำ	24
17	ลักษณะอนุภาคของ pPVC ภายหลังจากผ่านการบดย่อย	24
18	เครื่องอัดขึ้นรูปยาง	28
19	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สมบัติการไหลของยาง	29
20	เครื่อง ODR ที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะการคงรูปของยาง	30
21	ลักษณะการคงรูปของยางที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา	30
22	เครื่องตัดชิ้นงานยางแบบใช้กำลังลม	32
23	ลักษณะชิ้นงานยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบล	32
24	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	33
25	เครื่องทดสอบความแข็ง	34
26	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ	35
27	หลักการทดสอบความต้านทานต่อการขูดฉีกเนื่องจากแรงอัด	36
28	เครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อการขูดฉีกเนื่องจากแรงอัด	37

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	การทดสอบความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน	37
30	การทดสอบการต้านทานการลามไฟ	39
31	เครื่องทดสอบการบ่มเร่งด้วยความร้อน	40
32	เครื่องทดสอบการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	41
33	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน	44
34	ลักษณะการหลุดของอนุภาค pPVC ในยาง NR	44
35	ลักษณะการยึดเกาะของอนุภาค pPVC ในยาง NBR	45
36	ค่าความแข็งของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน	46
37	ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณ ต่างๆ กัน	47
38	เปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน	48
39	ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรภายหลังผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน	49
40	ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน	50
41	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต	51
42	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต	52
43	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต	53
44	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต	53
45	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	54
46	การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	ความเป็นไปได้ของการยึดเกาะของ MAH บนสายโซ่โมเลกุลของยาง NR (ก) และ (ข) การยึดเกาะที่เกิดจากปฏิกิริยา Free radical mechanism (ค) การยึดเกาะที่เกิดจากปฏิกิริยา Diels-Alder reaction	57
48	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	59
49	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	59
50	ลักษณะพื้นผิวของยาง NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR เมื่อผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	60
51	ลักษณะพื้นผิวของยาง NR+pPVC30 ที่ผสมยาง CR เมื่อผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	60
52	ลักษณะพื้นผิวของยาง NR+pPVC30 ที่ผสม MAH เมื่อผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	61
53	ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	62
54	ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	62
55	ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	63
56	ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	64
57	ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโยงแบบชั่วคราวระหว่างยาง NR สารตัวเติม pPVC และสารช่วยในการยึดเกาะยาง ENR	64
58	ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโยงแบบชั่วคราวระหว่างยาง NR สารตัวเติม pPVC และสารช่วยในการยึดเกาะยาง CR	65
59	ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโยงแบบชั่วคราวระหว่างยาง NR MAH และสารตัวเติม pPVC	65
60	ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันเองของยาง NR ที่ผสม MAH	66
61	ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของยาง NR ที่ผสม MAH กับ pPVC	66
62	ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรหลังผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	67
63	ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรหลังผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	68

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
64	ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน	69
65	ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน	69
66	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต	71
67	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต	71
68	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต	72
69	ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต	73
70	ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต	73
71	ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต	74
72	ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	75
73	ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	75
74	ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน	76
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเขม่าดำ	87

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NR	=	Natural rubber
NBR	=	Acrylonitrile butadiene rubber, Nitrile rubber
pPVC	=	Plasticized poly(vinyl chloride)
ENR	=	Epoxidized natural rubber
CR	=	Chloroprene rubber
MAH	=	Maleic anhydride
MBTS	=	Dibenzothiazyl disulphide
TMTD	=	Tetramethyl thiuramdisulphide
DPG	=	Diphenyl guanidine
ZnO	=	Zinc oxide
CTP	=	N-cyclohexylthiophthalimide
PBBs	=	Polybrominated biphenyls
CV	=	Conventional vulcanization
EV	=	Efficient vulcanization
Semi-EV	=	Semi-efficient vulcanization
ASTM	=	The American society for testing and materials
ISO	=	International organization for standardization
ODR	=	Oscillating disk rheometer
UV	=	Ultraviolet
phr	=	Parts per hundred rubber
T	=	Temperature
T <sub>g</sub>	=	Glass transition temperature
°C	=	Degree celsius

# อิทธิพลของพลาสติกไพล์ฟิวซีที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติและยางไนไตรล์

## Effect of Plasticized Poly(vinyl chloride) on Properties of Natural Rubber and Nitrile Rubber

### คำนำ

ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 3 ล้านตันต่อปี และมีส่วนแบ่งในตลาดโลกประมาณร้อยละ 30% ประเทศไทยมีการส่งออกยางธรรมชาติประมาณร้อยละ 90% ของผลผลิต ในขณะที่มีการนำยางธรรมชาติมาผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศเพียงร้อยละ 10% ของผลผลิตที่ได้ จากหลักฐานการนำเข้ายางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) ซึ่งนำเข้ามาในรูปแบบของยางชนิดต่างๆ ในปี พ.ศ. 2551 รายงานโดยศูนย์สารสนเทศยาง แสดงยอดการนำเข้าจากต่างประเทศสูง ประมาณปีละ 113,000 ตัน สาเหตุหลักประการหนึ่งอาจเนื่องมาจากสมบัติของยางธรรมชาติ ในเรื่องของการเสื่อมสภาพ (Aging property) และความสามารถในการต้านทานการลามไฟ (Flammability) ที่ด้อยกว่าเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์บางประเภท เช่น ยาง EPDM (Ethylene propylene diene rubber) และ ยาง CR (Chloroprene rubber) ในปัจจุบันปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์มีมากกว่ายางธรรมชาติ โดยปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์คิดเป็นร้อยละ 57 ในขณะที่การใช้ยางธรรมชาติคิดเป็นร้อยละ 43 เนื่องจากความต้องการยางที่มีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ความต้านทานต่อน้ำมันและสารเคมี เป็นต้น ยางสังเคราะห์ที่มีปริมาณการใช้มาก ได้แก่ ยาง SBR (Styrene butadiene rubber) และยาง NBR (Acrylonitrile butadiene rubber) เป็นต้น

บริษัทไทยโพรไฟล์ อินเตอร์พลาส จำกัด เป็นบริษัทผลิตและจัดจำหน่ายยางขอบกระจกรถยนต์ตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ภายในประเทศ วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางขอบกระจกรได้แก่ พลาสติกไพล์ฟิวซี (Plasticized Poly(vinyl chloride); pPVC) ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางขอบกระจกรถยนต์

อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตยางขอบกระจกรถยนต์ โดยส่วนใหญ่แล้วผลิตภัณฑ์ของเสีย (Defected part) เกิดขึ้นค่อนข้างมากในขั้นตอนของการเริ่มดำเนินการผลิตหรือในขั้นตอนการหาเงื่อนไขในการผลิต (Processing conditions) ที่เหมาะสม รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่เสียเนื่องจากรูปร่างที่บิดเบี้ยว ไม่ได้ขนาดตรงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งมีปริมาณมากถึง 3 ตันต่อปี จากข้อมูลของโรงงานผู้ผลิตโดยส่วนใหญ่แล้ว ของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปฝังกลบ (Landfill) หรือเผาทำลาย เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ HCl ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของพีวีซี ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมากต่อผู้ที่สูดดม

ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพีวีซี ซึ่งผ่านกระบวนการผลิตแล้วกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง ในลักษณะของสารตัวเติม (Filler) ที่ใช้ในยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิต ตลอดจนความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพบางอย่าง เช่น สมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต รวมถึงสมบัติความต้านทานการลุกติดไฟ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการกำจัดของเสีย เช่น การขนย้ายในระหว่างการกำจัด ตลอดจนลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบ หรือเผาทำลายเพื่อเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

## วัตถุประสงค์

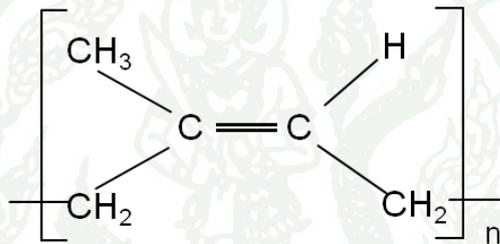
1. เพื่อประเมินความสามารถและความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์ยางขอบกระจกพีวีซีที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วมาหมุนเวียนใช้อีก โดยนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในยาง NR และยาง NBR
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะ (Compatibilizer) และสารเชื่อมประสาน (Coupling agent) ที่มีต่อสมบัติของยาง NR ที่ใช้ยางขอบกระจกพีวีซีเป็นสารตัวเติม



## การตรวจเอกสาร

### 1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR)

(พงษ์ธร, 2547) ยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพืชชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* โดยองค์ประกอบทางเคมีจัดเป็นสารประกอบประเภท Hydrocarbon ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลของ 1 โมเลกุลจะประกอบไปด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาว โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ย 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) ประมาณ  $-72^\circ\text{C}$



ภาพที่ 2 โครงสร้างยางธรรมชาติแบบ cis-1,4-polyisoprene

โมเลกุลของยางมีพันธะคู่และหมู่แอลฟาเมทิลีน ( $\alpha$ -methylene) ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาควบรูปด้วยกำมะถัน แต่มีข้อเสีย คือที่บริเวณพันธะคู่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ ออกซิเจน และ โอโซน โดยมีโลหะ ความร้อน แสง และความเครียดภายในเนื้อยางเป็นตัวเร่งให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เมื่อตั้งทิ้งไว้ หรือในขณะที่ใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีต่างๆ เพื่อเก็บรักษา หรือยืดอายุการใช้งาน เช่น สารเคมีที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) และสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน (Antiozonant) เป็นต้น

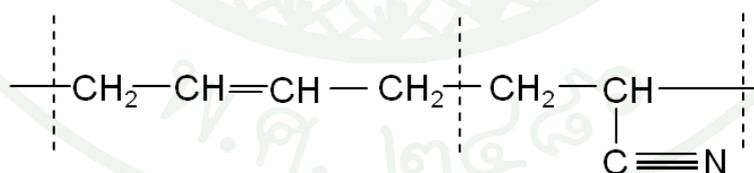
ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เนื่องจากการยืดตัว หรือที่เรียกว่า Strain-induced crystallization ซึ่งเกิดได้เมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวกว่าเดิมประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของยางทำให้ยางมีสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างชัดเจน โดยเปลี่ยนสภาพจากโปร่งแสง (Transparent) ไปเป็นทึบแสง (Opaque) ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวทำให้ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปมาแล้ว มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น นั่นคือยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงที่สูง เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นช่วยให้ยางมีความแข็งแรง รวมทั้งความต้านทานต่อการฉีกขาดทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ยังให้ความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายเริ่มลดลงเมื่อผ่านกระบวนการคงรูป เนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งสามารถยับยั้งการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเกิดเพียงแค่การบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น และนอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางธรรมชาติอาจทนต่อของเหลวที่มีขั้วบางประเภท เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ รวมทั้งทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี

ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-55^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $70^{\circ}\text{C}$  การเก็บยางธรรมชาติไว้ที่อุณหภูมิ ต่ำนานๆ อาจทำให้ยางธรรมชาติเกิดการตกผลึก ซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป หากใช้งานที่ อุณหภูมิสูงเกินไป ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ลดลง เนื่องจากความร้อนทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในกรณีที่มี การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง  $90^{\circ}\text{C}$  หรืออาจสูงถึง  $100^{\circ}\text{C}$

## 2. ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber; NBR)

ยาง NBR เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นโคโพลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile monomer) และบิวตาไดอีน (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ 15-18 % จาก โครงสร้างของโมเลกุล และเนื่องจากส่วนของอะคริโลไนไตรล์มีหมู่ฟังก์ชันไซยาไนด์ ส่งผลให้โมเลกุลของยางมี ความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ในขณะที่ ส่วนของบิวตาไดอีนเป็นส่วนที่ทำให้ความยืดหยุ่นและเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงในระหว่าง กระบวนการคงรูปของยาง NBR



ภาพที่ 3 โครงสร้างยาง NBR

สมบัติของยาง NBR แปรผันตรงตามสัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ที่มีอยู่ในโมเลกุล โดยทั่วไป เมื่อ ปริมาณของอะคริโลไนไตรล์สูงขึ้น ยาง NBR จะมีความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลาย ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น ความทนทานต่อความร้อนและโอโซน รวมถึงสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ เช่น ความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สมบัติการกระด้างกระดอน สมบัติความต้านทานต่อ การอัดตัว และสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าลดลง

นอกจากสมบัติต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) กล่าวคือค่า  $T_g$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ค่า  $T_g$  ของยาง NBR จะอยู่ในช่วง  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3. สารเคมีสำหรับยาง (Additives)

(พรพรรณ, 2528; วิภา, 2544) สารเคมีสำหรับยาง คือสารเคมีที่ผสมลงในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิต การวัลคาไนซ์ และการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้งาน โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสารเคมีที่ผสมในยางนิยมใช้หน่วย phr (Parts per hundred of rubber) ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนั้นยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จนกว่าสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง โดยยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีเรียกว่า ยางคอมปาวด์ (Rubber compound) และเรียกยางภายหลังทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้วว่า ยางคองรูป (Vulcanized rubber)

การผสมสารเคมีลงไปในยางมีวัตถุประสงค์ดังนี้คือ

1. ความเป็นวิสโคอิลาสติก (Viscoelasticity) คือ วัสดุสมบัติทั้งเหนียวเหนืดเหมือนของเหลว และยืดหยุ่นเหมือนของแข็งในเวลาเดียวกัน การที่ยางมีสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกนี้ ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง
2. ยางมีขอบเขตการใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด ที่อุณหภูมิต่ำยางมีความแข็งเปราะ แตกหักได้ง่าย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะนิ่มหรือแข็ง การผสมสารเคมีในยางในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้สมบัติของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เช่นความแข็งเพิ่มขึ้น สามารถทนความร้อนได้มากขึ้น
3. ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ
4. ยางสามารถละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด เช่น โทลูอีน (Toluene) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) เป็นต้น
5. กระบวนการผลิตยางทำได้ยากเนื่องจากความเหนียวของยาง การเติมสารเคมีช่วยปรับปรุงให้สามารถผสมหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น

โดยทั่วไปแล้วสารเคมีและสารตัวเติม สำหรับยางสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

#### 3.1 สารที่ทำให้ยางคองรูป (Vulcanizing agents)

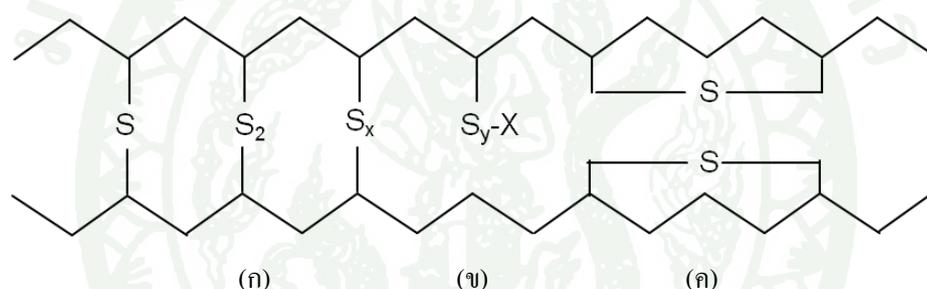
สารที่ทำให้ยางคองรูป เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยระหว่างโมเลกุลของยางตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่ากระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือกระบวนการคองรูป การวัลคาไนซ์ คือกระบวนการเปลี่ยนยางให้มีความเป็นอิลาสติกสูงขึ้น ความแข็งแรง มอดูลัส และความต้านทานต่อการ

สึกหรอเพิ่มขึ้น รวมทั้งการที่ยางสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น และยางสามารถต้านทานต่อสารละลายต่างๆ ได้ดีขึ้น

สารที่ทำให้ยางคงรูป แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

### 1. กำมะถัน (Sulfur)

กำมะถันเป็นสารคงรูปที่นิยมใช้มากที่สุด และนิยมใช้กับยางที่มีความไม่อิ่มตัว หรือมีพันธะคู่ (Double bond) อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ Natural rubber (NR), Styrene-butadiene rubber (SBR), Cis-1,4-polyisoprene (IR), Butadiene rubber (BR) และ Acrylonitrile butadiene rubber (NBR) เป็นต้น โดยเมื่อเติมกำมะถันเข้าไปในยาง และให้ความร้อน เพื่อเร่งปฏิกิริยา ยางจะเกิดการคงรูปโดยมีกำมะถันเป็นตัวเชื่อมระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง (Crosslink) โดยลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ชนิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Type of sulfur crosslink)

จากภาพที่ 4 แสดงชนิดของการเกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยที่ภาพ (ก) แสดงการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic, -S-) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic, -S<sub>2</sub>-) และพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic, -S<sub>x</sub>-) ตามลำดับ ภาพ (ข) แสดงการเชื่อมโยงแบบเพนเด้นท์ (Pendant sulfur, -S<sub>y</sub>-X) และภาพ (ค) แสดงการเชื่อมโยงระหว่างกำมะถันภายในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Intermolecular linkage) ชนิดของพันธะเชื่อมโยงของกำมะถันนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเร่งและอัตราส่วนระหว่างกำมะถันและสารเร่ง

การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน โดยทั่วไปมีระบบวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ

1. ระบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization; CV) ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของยางในระบบนี้ จะให้พันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก
2. ระบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization; EV) ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของยางในระบบ EV มีพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบโมโนซัลฟิดิก
3. ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization; Semi - EV) ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของยาง

ในระบบ Semi-EV มีพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก โดยมีสมบัติอยู่ระหว่างยางที่ผ่านปฏิกิริยาคาลาไนเซชันในระบบ CV และ EV

ตารางที่ 1 อัตราส่วนระหว่างสารเร่งกับกำมะถันในระบบต่างๆ (Hofmann, 1989)

ระบบการวัลคาไนซ์	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารเร่ง (phr)	อัตราส่วนสารเร่งต่อกำมะถัน
CV	2.0-3.5	0.4-1.2	0.1-0.6
Semi-EV	1.0-1.7	1.2-2.5	0.7-2.5
EV	0.4-0.8	2.0-5.0	2.5-12.5

ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางแตกต่างกัน โดยยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์โดยระบบ CV มีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) การกระดอน (Rebound resilience) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ที่ดี แต่ความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat resistance) และความต้านทานต่อการอัดตัว (Compression set) ไม่ดีนัก สำหรับยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบ EV มีพันธะเชื่อมโยงแบบโมโนซัลฟิดิก ซึ่งเสถียรต่อความร้อน ส่งผลให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและความต้านทานต่อการอัดตัวดีขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงดึง และการกระเด็นกระดอนต่ำ ในขณะที่ยางที่วัลคาไนซ์ในระบบ Semi-EV มีสมบัติอยู่ระหว่างยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบ CV และระบบ EV ตารางที่ 2 แสดงสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบต่างๆ

ตารางที่ 2 สมบัติต่างๆ ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบต่างๆ (Toki, 2003)

Properties	CV	Semi-EV	EV
Poly- and disulfidic crosslink, (%)	95	50	20
Monosulfidic crosslink, (%)	5	50	80
Cyclic sulfidic concentration	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Heat-aging resistance	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
Reversion resistance	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
Compression set, 22 h. at 70 °C, (%)	30	20	10

กำมะถันที่ใช้ในยางต้องเป็นกำมะถันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เพื่อการกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น ส่งผลให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้อย่างทั่วถึง โดยทั่วไปแล้วการเติมกำมะถันลงไปในช่วงต้องเติมหลังสุดในระหว่างกระบวนการบดผสม (Compounding) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด หรือเกิดยางตาย (Scorch) แต่ยางบางชนิด เช่น NBR กำมะถันมีการกระจายตัวไม่ดึ้นก ซึ่งทำให้ต้องเติมกำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้นของการบดผสมยาง เพื่อให้เวลาในการกระจายตัวเพิ่มขึ้น การใช้กำมะถันมีข้อดี คือ กำมะถันมีราคาถูก กระจายตัวได้ง่ายใน

ยาง ไม่เป็นอันตราย และมีผลโดยตรงต่อสารเร่ง จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดวัลคาไนซ์ แต่ก็มีข้อเสีย คือ กำมะถันอาจเกิดการซึมขึ้นมาที่ผิวของยาง หรือที่เรียกว่า ปรากฏการณ์บลูมิ่ง (Blooming) สามารถใช้กับยางที่มีโครงสร้างที่ไม่อึดตัวเท่านั้น และยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วอาจมีสมบัติความต้านทานต่อความร้อนได้ไม่ดีนัก

## 2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor)

สารที่ให้กำมะถันเป็นสารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ ได้แก่ เตตระเมทิลไทยเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulfide; TMTD) ไดโมโฟลไดซัลไฟด์ (Dimorpholine disulfide; DTD) ไดเพนตะเมทิลีนไทยเรมเตตระซัลไฟด์ (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide; DPTT)

## 3. สารอื่นที่ไม่ใช่กำมะถัน

สารอื่นที่ไม่ใช่กำมะถันเป็นสารที่ใช้กับยางที่มีความอึดตัว เช่น ยางซิลิโคน (Silicone; Q) ยางเอธิลีนพรอพิลีน (Ethylene propylene; EPM) ยางยูรีเทน (Polyurethane; AU) ยางเอธิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene Vinyl Acetate; EVA) เป็นต้น การเชื่อมโยงของยางเกิดเพียงพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนจากโมเลกุลของยางเท่านั้น ซึ่งมีเสถียรภาพดีมาก สารที่ไม่ใช่กำมะถันที่นิยมใช้กับยาง ได้แก่ โลหะออกไซด์ (Metal oxide) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เป็นต้น

### 3.2 สารเร่งปฏิกิริยาให้คงรูป (Accelerators)

ในการวัลคาไนซ์ยาง หากใช้สารที่ทำให้ยางคงรูป เช่น กำมะถันเพียงอย่างเดียว ปฏิกิริยาของรูปหรือเวลาในการวัลคาไนซ์ยางจะดำเนินไปอย่างช้ามาก ซึ่งอาจต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่มาก และต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเกินความจำเป็น สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่เติมลงไปในช่วงขณะทำการบดผสม เพื่อช่วยลดเวลาและอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ของยาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารที่ใช้ สารเร่งปฏิกิริยาให้คงรูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ

1. ระบบการใช้สารตัวเร่งเพียงชนิดเดียว (Primary accelerator) เป็นระบบที่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงตัวเดียวที่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการวัลคาไนซ์
2. ระบบการใช้สารตัวเร่งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป (Secondary accelerator) เป็นการใช้สารตัวเร่งชนิดแรกในปริมาณมาก และอีกชนิดใช้ในปริมาณน้อย เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์
3. ระบบการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาช้า (Delay action accelerator) สารประเภทนี้ช่วยป้องกันปัญหาของรูปก่อนเวลา

### 3.3 สารกระตุ้น (Activator)

สารกระตุ้น คือสารที่ช่วยเสริมให้สารเร่งปฏิกิริยาของรูปทำงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น สารกระตุ้นอาจเป็นสารอินทรีย์ (Organic) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic) โดยสารอนินทรีย์ที่สำคัญ และนิยมใช้ คือซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เลดออกไซด์ (Lead oxide) และแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) ขณะที่สารกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือพวกรกรดไขมัน (Fatty acid) เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิก (Palmitic acid) เกลืออะมีน (Amine salt) เป็นต้น

### 4. สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือสารที่ผสมลงในยางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมถูกใช้กับยางมาตั้งแต่ระยะแรกที่เริ่มใส่สารเคมีเข้าไปในยาง สารตัวเติมเหล่านี้ เช่น ซอล์ ดิน แต่หลังจากที่อุตสาหกรรมรถยนต์มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น ความต้องการการผลิตยางรถยนต์ที่ทนทานมีมากขึ้น โดยการใช้สารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ยางล้อยิ่ง ในปี 1904 พบว่าเขม่าดำ (Carbon black) ซึ่งได้จากโดยการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยางได้ ในปี ค.ศ. 1912 Tow และ Oonslager พบว่า เขม่าดำที่ผสมในยางส่งผลให้ยางมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีขึ้น ในเวลาต่อมาจึงนิยมนำเขม่าดำมาใช้เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler) ในยางเกือบทุกประเภท

ซิลิกา (Silica;  $\text{SiO}_2$ ) ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมประเภทเสริมประสิทธิภาพที่ไม่ใช่สีดำ ซิลิกามีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก โดยในขณะที่ทำการบดผสมในยางอาจก่อให้เกิดความร้อนสูงส่งผลให้เกิดการสุกของยางได้ง่าย ผิวของซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์มีฤทธิ์เป็นกรดและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเคมีอื่นได้ แต่การเกิดพันธะกับยางซึ่งเป็นสารอินทรีย์ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้ยางที่ผสมซิลิกามีโมดูลัสและความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางที่ใช้เขม่าดำ

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate;  $\text{CaCO}_3$ ) และแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate;  $\text{CaSiO}_2$ ) ที่ใช้ในยางอาจได้มาจากธรรมชาติ หรือการสังเคราะห์ โดยทั่วไปอนุภาคของสารตัวเติมประเภทนี้มีขนาดใหญ่ ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสริมแรงจึงไม่ดีมากนัก เมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา

ไชน่าเคลย์ (China clay) หรือเกาลิน (Kaolin) ที่มีส่วนประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่น เช่น เหล็ก ไททาเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม โปแตสเซียม โซเดียม และอาจมีแมงกานีสปนอยู่ด้วย ไชน่าเคลย์ชนิดละเอียดมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ต่ำกว่า 2 ไมครอน เมื่อผสมลงในยาง ส่งผลให้โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเพิ่มสูงขึ้น ไชน่าเคลย์ชนิดหยาบซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 2 ไมครอน ให้ยางที่มีโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางที่ใช้ไชน่าเคลย์ชนิดละเอียด แต่ยางที่ใช้ไชน่าเคลย์ชนิดหยาบให้อัตราการคงรูปที่รวดเร็วกว่า

ในปัจจุบันนอกจากสารตัวเติมที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีการใช้สารตัวเติมประเภทอื่นๆ อีกตัวอย่างเช่น จากงานวิจัยของจตุพร และ อรสา (2549) ได้ทำการคัดแปรสภาพปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยคัดแปรองปาล์มน้ำมันในส่วนองเปลือกองผล (Palm oil sludge; POS) และ เมล็ดคิน (Palm kernel meal; PKM) จากผลการทดลองพบว่าอนุภคององปาล์มที่มีขนาดเล็กลง ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าอนุภคองขนาดใหญ่ แต่ใช้เวลายในการคงรูปที่นานกว่า ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณองปาล์มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง นอกจากนี้ ยุทธชาติ และ คณะ (2547) ได้ศึกษาองคอมโพสิตจากยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ โดยศึกษาลักษณะการคงรูปและสมบัติเชิงกลองยางคอมโพสิต จากผลการวิจัยพบว่า ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูป ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืดจนขาด และความต้านทานต่อการลิกนาคลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ซึ่งนอกจากเถ้าลอยลิกไนต์ แล้ว ศิรินทร และ ณรงค์ฤทธิ์ (2551) ได้ศึกษาความเป็นไปได้องการนำเถ้าลอยในประเทศไทยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ และเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้ำ โดยนำเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้ำมาทำการปรับปรุงผิวด้วย Si69 (Bis(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide) ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมลงในยางธรรมชาติปริมาณ 30-75 phr จากการทดลอง พบว่าเถ้าลอยสามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ และสามารถทดแทนซิลิกาเกรดการค้ำได้ในปริมาณซิลิกา 30 phr ซึ่งให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการลิกนาค และค่าความแข็งเทียบเท่ากัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นอีลาสติคองยางดีกว่าซิลิกาเกรดการค้ำด้วย

นอกจากนี้ยังมีสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) โดยประณัฐ และคณะ (2550) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยผักตบชวามาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ซึ่งทำโดยการบดผสมยางธรรมชาติ (STR 20) และเส้นใยผักตบชวาซึ่งผ่านการบดพร้อมทั้งสารเคมีต่างๆ โดยศึกษาอิทธิพลองปริมาณสารตัวเติม (5 และ 10 phr) และขนาดองเส้นใยผักตบชวา (ละเอียด ปานกลาง หยาบ) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งและมอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณและขนาดองเส้นใยผักตบชวาเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการลิกนาคมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นจึงมีการใช้สารเชื่อมประสาน (Coupling agent) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเส้นใยผักตบชวาและยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น

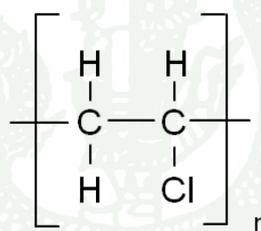
พลาสติกบางชนิดสามารถนำมาผสมในยางได้ ซึ่งจักรวธ และคณะ (2549) ได้ศึกษาสมบัติองพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางธรรมชาติและได้ทำการปรับปรุงให้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer) ที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยทำการผสมพอลิพรอพิลีนเกรด PP2500H และเกรด PP3200H กับยางธรรมชาติ เกรด STR 20 และศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลองพอลิเมอร์ผสม ยกตัวอย่างเช่น ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น ทำให้สมบัติองพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เกรดการค้ำมากยิ่งขึ้น

## 5. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride); PVC)

PVC คือเทอร์โมพลาสติก ที่ได้จากการพอลิเมอไรเซชันของไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl chloride monomer) ในปัจจุบันมีการนำ PVC มาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายด้วยเทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว PVC สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. PVC ชนิดแข็ง (Rigid PVC) คือ PVC ที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) มีสมบัติแข็ง ความหนาแน่นประมาณ  $1.38 \text{ kg/dm}^3$  ทนความร้อนได้ถึง  $80^\circ\text{C}$  PVC ชนิดนี้ถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทท่อ กรอบประตู และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

2. PVC ชนิดอ่อน (Flexible PVC) มีลักษณะคล้ายยาง โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปซึ่งเรียกว่า Plasticized PVC (pPVC) พลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ฟาทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate ester) โดยผสมในอัตราส่วนประมาณร้อยละ 40-60 ส่งผลให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของ PVC ลดลง จึงมีสมบัติคล้ายยาง สามารถนำมาใช้ทำเป็นท่อ ยาง เสื่อ กันฝน ปลอกหุ้มสายไฟฟ้า กระเบื้องยางปูพื้น และหนังเทียม เป็นต้น



ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างของ PVC

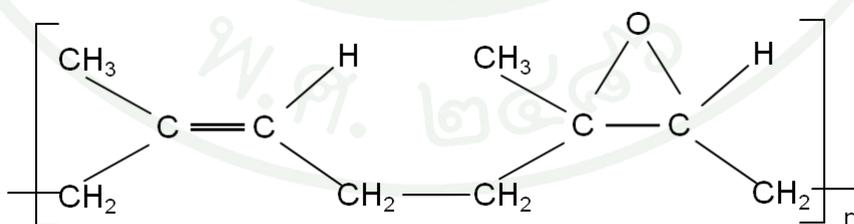
PVC เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) โดยทั่วไปสมบัติของ PVC คือไม่ติดไฟ เนื่องจากมีอะตอมคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ทนต่อกรด ด่าง และสารเคมี ไม่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว จากสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมา รวมทั้งความเป็นเทอร์โมพลาสติก PVC จึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดย Ismail และคณะ (2004) ได้ศึกษาวิธีที่เป็นของเสีย PVCw (Waste poly(vinyl chloride)) โดยการผสมกับ NBR และทำการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MAH) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PVCw และ NBR จากผลการทดสอบสมบัติของ PVCw และ NBR ที่ผสม MAH พบว่า ค่าแรงบิด พลังงานเชิงกล (Mechanical energy) ค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นที่ระยะยืด 100% มีค่าสูงกว่า PVCv, PVCw และยาง NBR ที่ไม่ผสม MAH แต่ระยะยืดที่จุดขาดและดัชนีการบวมตัว (Swelling index) ต่ำกว่าและเมื่อนำไปทดสอบด้วย SEM (Scanning electron microscopy) เพื่อดูลักษณะการแตกหักที่ผิวเนื่องจากแรงดึงของ PVCw และยาง NBR ที่ผสม MAH พบว่า MAH สามารถเพิ่มแรงดึงจุดที่ผิวเฟสของ PVCw และ NBR นั่นคือ MAH สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของการผสม PVCw และ NBR ในขณะเดียวกัน Wang และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษา PVC ชนิดแข็ง (Rigid PVC) ซึ่ง

ประกอบด้วย PVC และ Ultrafine full-vulcanized powdered rubber (UFPR) สาร UFPR ที่ใช้ในที่นี่ คือ Butadiene nitrile UFPR-1 (NBR-UFPR-1) โดยมีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร และ Butadiene nitrile UFPR-2 (NBR-UFPR-2) โดยมีขนาดอนุภาค 90 นาโนเมตร ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก  $3.1 \text{ kJ/m}^2$  เป็น  $5.2$  และ  $5.5 \text{ kJ/m}^2$  ตามลำดับ สมบัติที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจาก การกระจายตัวที่พื้นผิวดีขึ้น และเกิดปฏิกิริยาที่พื้นที่ผิวมากขึ้น ระหว่าง NBR-UFPRs และ PVC โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM (Transmission electron microscopy) แสดงให้เห็นว่า NBR-UFPRs สามารถกระจายตัวได้ดีใน PVC

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง ได้แก่ ชนิด ปริมาณ และขนาดของสารตัวเติม รวมทั้งความเข้ากันได้ระหว่างยางและสารตัวเติม โดยทั่วไปแล้วการปรับปรุงความเข้ากันได้ สามารถทำได้โดยการตัดแปลงผิวของสารตัวเติมโดยใช้สารเคมี (Coupling agent) หรือทำโดยการเติมสารช่วยในการยึดเกาะ (Compatibilizer) เป็นต้น

## 6. ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydized natural rubber; ENR)

ยาง ENR เป็นยางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation) นั่นคือการทำให้เกิดหมู่อีพอกไซด์ (Epoxy) หรือออกซิเรน (Oxirane) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ โดยวิธีการทำปฏิกิริยาที่นิยมมากที่สุด คือ การเติมกรดเปอร์ออกไซด์ลงไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติ เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ (Epoxy ring) ดังแสดงในภาพที่ 6 ยาง ENR ถูกผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ยางมีความเป็นขั้วมากขึ้น สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น สามารถทนต่อโอโซน และการซึมผ่านของก๊าซได้ดี เนื่องจากพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลง อย่างไรก็ตาม ยาง ENR อาจมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง และสมบัติความยืดหยุ่น โดยทั่วไปยาง ENR มักใช้ในอุตสาหกรรมกาว หรือสารยึดติด รองเท้า สี และยางรถยนต์ เป็นต้น (จริญญา, 2546)



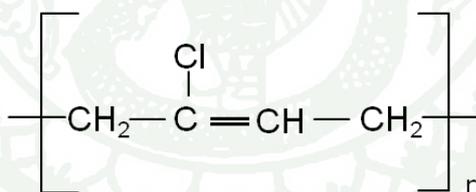
ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างของยาง ENR

การปรับปรุงความเข้ากันได้ของยาง และสารตัวเติมโดยใช้สารช่วยในการยึดเกาะยาง ENR เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดของยางและสารตัวเติม ส่งผลให้การเสริมแรงของสารตัวเติมมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดย George และคณะ (2002) พบว่าการผสมยาง ENR ในยาง NBR ซึ่งเสริมแรงด้วยซิลิกา สามารถปรับปรุง

สมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความแข็ง จากสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า ยาง ENR สามารถใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะที่ดีระหว่างยาง NBR กับซิลิกา เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Teh และคณะ (2004) ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารช่วยในการยึดเกาะยาง ENR ต่อการเสริมแรงด้วย Organoclay ในยางธรรมชาติ โดยการใช้ระบบการคงรูปแบบ CV จากผลการทดสอบ พบว่าการเติมยาง ENR ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ส่งผลให้การคงรูปของยางเร็วกว่า 25 เปอร์เซ็นต์โมล รวมทั้งความหนาแน่นโครงสร้างร่างแห (Crosslink density) การกระจายตัวของ Organoclay ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ดีกว่า

## 7. ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber; CR)

ยาง CR มีชื่อทางการค้าว่ายางนีโอพรีน (Neoprene) เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของคลอโรพรีน (Chloroprene monomer) โมเลกุลของยาง CR สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 7 ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ทำให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูง ยาง CR มีสมบัติที่เด่นมาก คือ ความเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี ทำให้สามารถใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบจากหลายชิ้นส่วน ยางชนิดนี้ยังสามารถไหลเข้ามาเชื่อมกันได้ดี จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหารอยต่อของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอสูงอีกด้วย (พงษ์ธร, 2541)



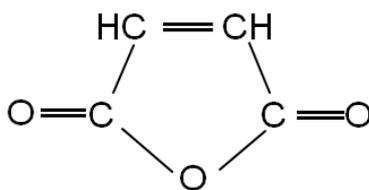
ภาพที่ 7 สูตรโครงสร้างของยาง CR

จากสมบัติดังกล่าวนี้ จึงได้มีการนำยาง CR มาใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะ เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางและสารตัวเติมโดยจากงานวิจัยของ Choi (2002) ได้ปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมซิลิกา โดยการผสมยาง CR จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของซิลิกาในยางธรรมชาติดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการเกิดรอยแตกเพิ่มขึ้น และยังพบว่าระยะยึด ที่จุดขาดมีค่าสูงกว่า นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Das และคณะ (2004) ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของการผสมยาง CR ที่มีต่อการกระจายตัวของซิลิกาในยาง EPDM พบว่าเมื่อผสมยาง CR ในยาง EPDM ซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ โมดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากการใช้ยาง ENR และยาง CR เป็นสารช่วยในการยึดเกาะในยางและสารตัวเติมแล้ว ยังสามารถนำไปใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะระหว่างยางผสม โดยจากงานวิจัยของซัววาลซ์ และคณะ (2550) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะต่อสมบัติการไหล (Rheological properties) ความหนาแน่น โครงสร้างร่างแห และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง NBR โดยใช้สารช่วยในการยึดเกาะยาง CR และยาง ENR ซึ่งใช้อัตราส่วนของยาง NR และ NBR คือ 20:80 และใช้ปริมาณของสารช่วยในการยึดเกาะระหว่าง 0 ถึง 7 phr ผลการทดลองพบว่า การเติมสารช่วยในการยึดเกาะยาง CR และยาง ENR ทำให้ค่าความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสารช่วยในการยึดเกาะยาง ENR นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสารช่วยในการยึดเกาะไม่ส่งผลต่อเวลาในการคงรูป และค่าความแตกต่างแรงบิด แต่ส่งผลให้ความหนาแน่น โครงสร้างร่างแห และสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยการเติมสารช่วยในการยึดเกาะ 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

## 8. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MAH)

MAH คือสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงในภาพที่ 8 ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ของเบนซีน หรือสารประกอบอะโรมาติกอื่นๆ เช่น เอ็น-บิวเทน (n-butane) โดยทั่วไปนิยมใช้ n-butane เป็นวัตถุดิบในการผลิตมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก โดยทั่วไปแล้ว MAH เป็นของแข็งใส ไม่มีสี ละลายได้ในน้ำ อะซีโตน แอลกอฮอล์ และไดออกเซน สามารถละลายได้บางส่วนในคลอโรฟอร์ม มีจุดหลอมเหลวประมาณ  $52.8^{\circ}\text{C}$  สามารถนำไปใช้เป็นตัวกลางในการสังเคราะห์ กรดฟูมาริก (Fumaric acid) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) และใช้เป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง นั่นคือการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ของ MAH กับพอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือพอลิเมอร์จากธรรมชาติ โดยผลิตภัณฑ์โคพอลิเมอร์ที่ได้ มีการนำไปใช้เป็นตัวกระตุ้นในการผสม (Reactive blends) เป็นสารเชื่อมประสาน หรือเป็นวัสดุผสมในวัสดุเทอร์โมพลาสติก โดยจากงานวิจัยของ George และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ระหว่าง NBR และ PP ซึ่งได้ศึกษาถึงอัตราส่วนของการผสม และสารเชื่อมประสาน จากผลการทดลองพบว่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณ NBR ที่ผสมเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารเชื่อมประสาน พบว่า Phenolic-modified PP และ Maleic-modified PP ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการเชื่อมประสานในเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Pichaiyut และคณะ (2008) ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารเชื่อมประสานต่อสมบัติทางไดนามิก (Dynamic properties) และสมบัติเชิงกล ของ MNR/HDPE TPVs (Maleated natural rubber/High-density polyethylene thermoplastic vulcanizates) โดยสารเชื่อมประสานที่ใช้ คือ Phenolic modified PE และ HDPE-g-MA (Graft copolymer of HDPE and maleic anhydride) ผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดตัวที่จุดขาด ความยืดอยู่ตัว (Tension set) ความแข็ง และสมบัติทางไดนามิกของ TPV ที่เติมสารเชื่อมประสาน ให้สมบัติที่ดีกว่า TPV ที่ไม่เติมสารเชื่อมประสาน



ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้าง MAH

## 9. กระบวนการผลิตยาง (Rubber processing)

(วารสารณ์, 2541) กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การบดยางให้นิ่ม (Mastication) การผสมยางกับสารเคมี (Mixing) และกระบวนการขึ้นรูป (Forming) รวมถึงกระบวนการคงรูป (Vulcanization)

ยางจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบด เพื่อลดความแข็งและความหนืดของยาง หากไม่มีกระบวนการบดยาง การผสมสารเคมีลงไปในยางก็สามารถทำได้ยาก โดยเฉพาะยางธรรมชาติ เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก การบดยางให้นิ่มเป็นการทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางฉีกขาดส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดลดลง วิธีการบดยางให้นิ่ม คือบดขย้างล้วน ๆ และอาจใช้สารย่อยยาง (Peptizer) เพื่อช่วยให้การบดผสมง่ายขึ้นด้วยเมื่อยางนิ่มพอเหมาะแล้วจึงทำการผสมสารเคมีให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนการเติมสารเคมีต่าง ๆ ในการบดผสมกับยางนั้นต้องจัดลำดับการเติมไว้อย่างถูกต้อง สารผสมที่ขนาดอนุภาคใหญ่ผสมกับยางได้ยากจะถูกเติมลงก่อน สารเคมีพวกสารเร่งให้ยางเกิดการคงรูปจะถูกจัดไว้ลำดับสุดท้าย ไม่เช่นนั้นแล้ว ยางคอมปาวด์ (อาจเกิดปัญหาคงรูปก่อนเวลา หรือที่เรียกว่า ยางตาย ซึ่งหมายถึงยางที่เกิดการคงรูปแล้ว ทั้งที่ยังไม่ได้นำไปขึ้นรูป ยางที่ได้บดผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้ว ควรเก็บไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เครื่องมือที่ใช้บดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. เครื่องบดผสมระบบเปิด (Open mill mixer) หรือที่เรียกว่า เครื่องบดผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก วางในแนวนอนให้แกนของลูกกลิ้งขนานกัน ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสามารถปรับระยะได้ ขนาดและความเร็วของลูกกลิ้งมีความสำคัญในการควบคุมให้ได้การกระจายตัวของสารเคมีที่ดี ซึ่งต้องใช้ความชำนาญในการบดผสมของผู้ปฏิบัติงาน
2. เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer) เป็นเครื่องบดที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการบดขย้างสามารถบดขย้างได้ในปริมาณมาก ซึ่งเครื่องบดนี้สามารถบดขย้างให้นิ่มได้รวดเร็วกว่าเครื่องบดแบบระบบเปิดและช่วยแก้ปัญหาการกระจายของสารตัวเติม เช่น เขม่าดำได้เป็นอย่างดี และไม่ต้องใช้ความชำนาญในการบดผสม แต่ต้องเสีเวลาเตรียมขย้างป้อนเข้าเครื่อง ตลอดจนการนำขย้างที่บดแล้วออกจากเครื่องมารีดเป็นแผ่นใน Two-roll mill



ภาพที่ 9 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง



ภาพที่ 10 เครื่องบดผสมระบบปิด

## 10. กระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization)

(Hofmann, 1989) กระบวนการวัลคาไนเซชัน หรือกระบวนการคงรูป คือกระบวนการภายหลังจากการผสมสารต่างๆ ในยาง ซึ่งกระบวนการวัลคาไนเซชัน มี 4 ขั้นตอน คือ

### 1. ขางเริ่มคงรูป (Onset of vulcanization)

ในขั้นนี้ยางเริ่มแข็งตึง (Stiffen) และไม่สามารถไหลต่อไปได้ ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถเกิดซ้ำ หรือเร็วขึ้นอยู่กับระบบของสารที่ใช้ทำให้ยางคงรูป กล่าวคือ หากใช้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันดีพอจะไวต่อปฏิกิริยาขั้นตอนนี้ อาจเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางปฏิบัติ ควรพยายามหลีกเลี่ยงการเกิดขั้นตอนนี้ที่เร็วเกินไป เพราะอาจทำให้เกิดปัญหาขางเริ่มคงรูปขณะบดผสม และในการบดผสมที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ จำเป็นต้องออกแบบสูตรสารประกอบขางให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปอย่างช้าๆ

### 2. ขางคงรูปไม่เต็มที่ (Under vulcanization)

เป็นขั้นตอนที่อยู่ระหว่างขางเริ่มคงรูปกับขางคงรูปเต็มที่แล้ว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มอดูลัสของขางเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเวลาการทำขางคงรูปเพิ่มขึ้น แต่ระดับของการเชื่อมโยงในโมเลกุลยังต่ำในขั้นนี้ ซึ่งทำให้สมบัติบางประการยังไม่ดีพอ เช่น ขางยังมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ สามารถยืดได้สูงมาก ไม่มีการคงรูปอย่างถาวร และขางยังเสื่อมสภาพได้ง่าย

### 3. ขางคงรูปเต็มที่ (Optimum vulcanization)

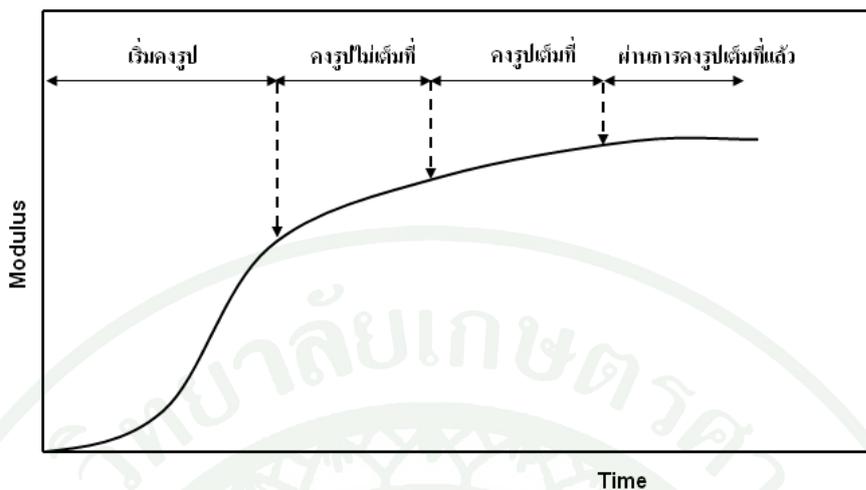
ส่วนใหญ่จะทำการวัลคาไนเซชันขางจนกระทั่งมีระดับของการเชื่อมโยงโมเลกุลค่อนข้างสูง หรือจนขางคงรูปเต็มที่ แต่ในทางปฏิบัตินั้น ไม่ถือเอาจุดสูงสุดของเส้นกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ( $t_{100\%}$ ) มาใช้ในการวัลคาไนเซชัน แต่จะใช้เวลาที่ต่ำกว่าจุดสูงสุดลงมาเล็กน้อย ( $t_{90\%}$  หรือ  $t_{95\%}$ ) เพื่อเป็นการลดพลังงานเพราะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขางไม่ได้สิ้นสุดลงทันทีเมื่อหยุดให้ความร้อน และในกรณีของความร้อนเนื่องจากการใช้งานสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปเพิ่มขึ้น

### 4. ขางคงรูปเกิน (Over vulcanization)

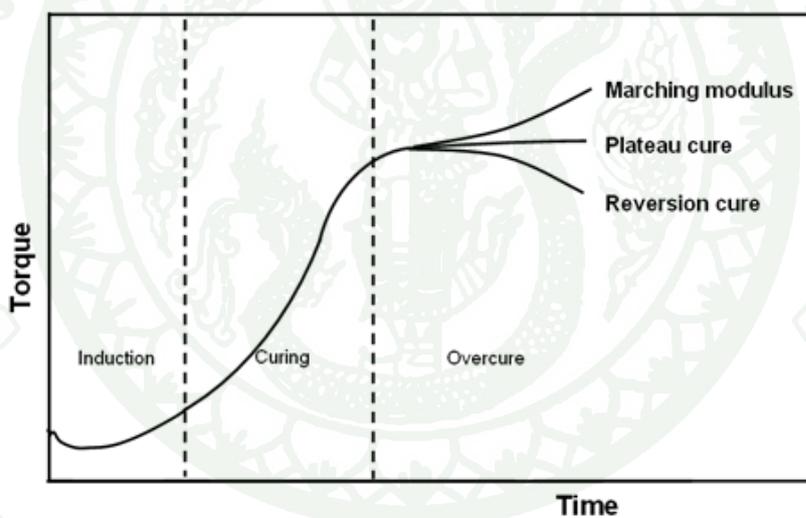
ลักษณะกราฟขางคงรูปเกินมี 3 ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งเป็นไปตามลักษณะใดนั้นขึ้นกับชนิดของขาง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของขางธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะการคงรูปเกินที่ค่าแรงบิดลดลง (Reversion) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของขางลดลง โดยขึ้นกับการเลือกใช้ระบบ และปริมาณสารที่ใช้ในการคงรูปขางด้วย

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อขางคงรูปเกินมี 2 แบบ ดังนี้

1. ปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล หรือเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน (Cyclizing reaction)
2. ปฏิกิริยาที่ทำให้การเชื่อมโยงโมเลกุลแตกออก (Breakdown of crosslink reaction)



ภาพที่ 11 ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการคงรูป



ภาพที่ 12 ลักษณะของคงรูปเกินจุดที่เหมาะสม

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 ขางธรรมชาติ เกรด STR 5L
- 1.2 ขาง NBR
- 1.3 ขางขอบกระจก pPVC
- 1.4 ขาง ENR 50
- 1.5 ขาง CR
- 1.6 MAH
- 1.7 สารเคมี
  - 1.7.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO)
  - 1.7.2 กรดสเตียริก (Stearic acid)
  - 1.7.3 กำมะถัน (Sulphur)
  - 1.7.4 เบนโซไทอะซอลไดซัลไฟด์ (Benzothiazole disulphide; MBTS)
  - 1.7.5 ไดฟีนิลกัวนิดีน (N,N' – diphenyl guanidine; DPG)
  - 1.7.6 เตตระเมทิลไทูรามไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulphide; TMTD)
  - 1.7.7 ริงสแตย์แอล (Wingstay L)
  - 1.7.8 พอลิโบรมิเนต ไบฟีนิล (Polybrominated biphenyls; PBBs)
  - 1.7.9 ไซโคลเฮกซิลไทโอฟะทาลิไมด์ (N-cyclohexylthiophthalimide; CTP)

## 2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น
เครื่องตัดยางก้อนแบบไฮโดรลิก	Daina รุ่น HD-30
เครื่องบดผสมยางระบบปิด (Internal mixer)	KNEADER MACHIAERY
เครื่องบดผสมยางระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)	Kodair seisakusho รุ่น R11-3FF
เครื่องอัดยางทรงรูป (Compression molding machine)	WABASH รุ่น V75H-18-BPX
เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม (Compress air sample cutting)	FRU1106GL1 รุ่น SDAP-100-N
ตู้อบสำหรับบ่มเรงยาง (Rubber aging oven)	UESHIMA รุ่น 900626
เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ของยาง (Mooney viscometer)	TECHPRO- visTECH รุ่น 123103
เครื่องทดสอบสมบัติการไหลของยาง (Oscilating disk rheometer)	TECHPRO-rheoTECH รุ่น 121105
เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test)	Instron รุ่น 1011
เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion test)	Hampden รุ่น APH-40
เครื่องทดสอบความต้านทานการอัดตัว (Compression test)	ATS รุ่น S/N94308004
เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟ (Flammability tester)	CEAST รุ่น 6151/000
เครื่องทดสอบความต้านทานการเสื่อมสภาพ (Accelerated weathering tester (Q-UV))	A-PANEL Lab Product รุ่น LU-0819
เครื่องทดสอบความแข็ง (Shore lever loader)	Shore LEVERLOADER รุ่น 716
เครื่องบดย่อย (Crusher)	บริษัทไทยมังกรจำกัด รุ่น JYSC-300

## วิธีการ

### 1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม pPVC ที่มีผลต่อสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติ

#### 1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวเติม pPVC ที่ใช้ในงานวิจัย

1. นำยางขอบกระจก pPVC ที่นำกลับมาใช้ใหม่มาทำการลดขนาดด้วยเครื่องบดย่อย (Crusher) ดังแสดงในภาพที่ 13 โดยใช้เวลาการบดย่อยประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงทำการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาด (Sieve analyzer) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 13 เครื่องบดย่อยเพื่อลดขนาดชิ้นงาน



ภาพที่ 14 เครื่องคัดแยกขนาด



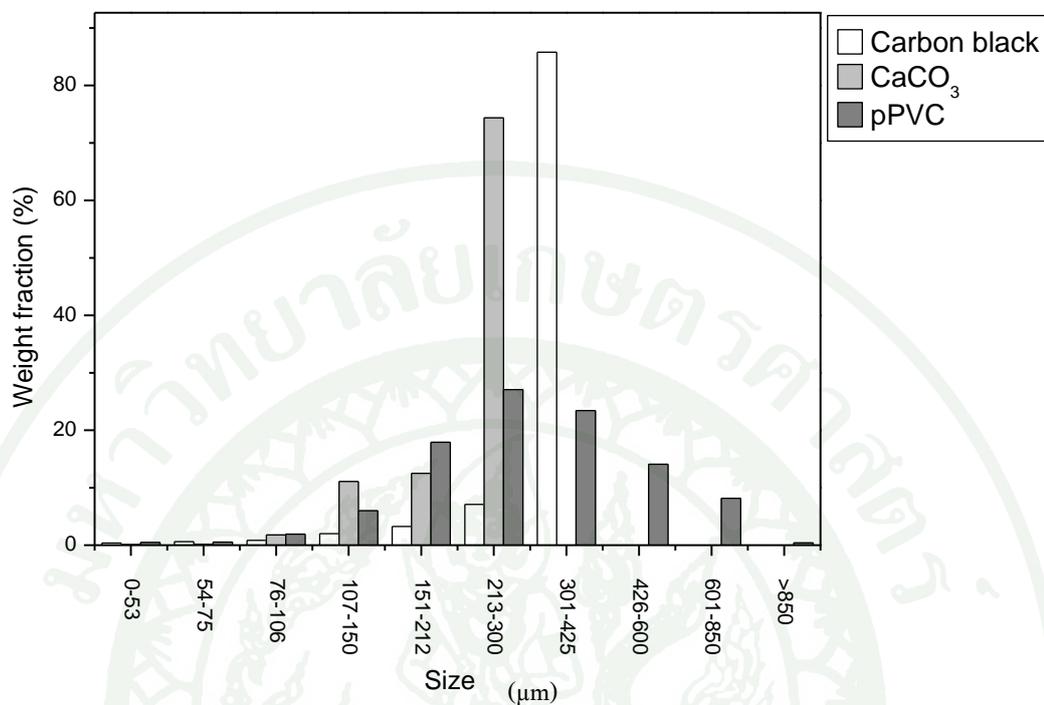
(ก)



(ข)

ภาพที่ 15 (ก) ลักษณะของยางขอบกระจก pPVC และ (ข) ยางขอบกระจก pPVC เมื่อผ่านการบดย่อย

2. วิเคราะห์ขนาดของอนุภาค pPVC ที่ได้ภายหลังจากการบดย่อยเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคสารตัวเติมที่ใช้กันในอุตสาหกรรม ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) และแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ดังแสดงในภาพที่ 16 จากผลการตรวจวัดพบว่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และ เขม่าดำ (Carbon black) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 213-300 ไมโครเมตร และ 301-425 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของ pPVC ที่ผ่านการบดย่อยอยู่ในช่วงระหว่าง 213-300 ไมโครเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้างกว่า โดยภาพที่ 17 แสดงลักษณะของอนุภาค pPVC ที่ผ่านการบดย่อย



ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของ pPVC กับ CaCO<sub>3</sub> และเขม่าดำ



ภาพที่ 17 ลักษณะอนุภาคของ pPVC ภายหลังจากผ่านการบดย่อย

3. ชั่งน้ำหนักยาง และสารเคมีที่ใช้รวมถึงปริมาณ pPVC ที่ผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6

จากการศึกษาอิทธิพลของ pPVC ที่มีต่อสมบัติของยาง NR และยาง NBR โดยได้ผสมในปริมาณ pPVC 0, 10, 20, 30, 40, 50 และที่มากกว่า 50 phr ตามลำดับ พบว่าที่ปริมาณ pPVC ที่ใกล้เคียงกันการเพิ่มขึ้น หรือการลดลงของสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกายภาพของยาง NR และยาง NBR เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณ pPVC ที่ผสม นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่า เมื่อทำการผสม pPVC ในปริมาณที่มากกว่า 50 phr จำเป็นต้องใช้เวลานานในการบดผสมที่นาน และทำให้การกระจายตัวของอนุภาค pPVC ภายในเนื้อยางไม่ดีนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาการผสม pPVC ในปริมาณ 0, 30 และ 50 phr ตามลำดับ

ตารางที่ 4 สูตรยางสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติของยาง NR

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
NR	100
Sulfur	1.5
ZnO	3
Steric acid	1
MBTS	1
DPG	0.2
TMTD	0.3
Wingstay L	1
pPVC	0, 30 และ 50

หมายเหตุ สูตรยางจากกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร

ตารางที่ 5 สูตรยางสำหรับการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติของยาง NBR

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
NBR	100
Sulfur	10
ZnO	3.4
PBBs	1.7
CTP	0.2
pPVC	0, 30 และ 50

หมายเหตุ สูตรยางจากบริษัท โพลีซีลแทรก จำกัด

ตารางที่ 6 สูตรยางสำหรับการศึกษาอิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติของยาง NR ที่มี pPVC เป็นสารตัวเติม

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)								
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7	สูตร 8	สูตร 9
NR	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ZnO	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Steric acid	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MBTS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DPG	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
TMTD	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Wingstay L	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pPVC	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ENR	5	10	15						
CR				5	10	15			
MAH							0.5	1.5	2.5

หมายเหตุ \* ปริมาณ pPVC ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากผลการทดลอง

## 1.2 ขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์

1. นำยางมาบดด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิประมาณ 70°C เพื่อลดความหนืดของยาง และเพื่อช่วยให้สารเคมีต่างๆ เข้าทำปฏิกิริยากับยางได้ง่ายขึ้น โดยขั้นตอนในการเติมสารเติมแต่งสำหรับยาง และระยะเวลาในการบดผสมโดยประมาณ แสดงดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ยางที่ได้จากการบดผสม เรียกว่ายางคอมปาวด์ จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปเข้าเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง เพื่อทำการรีดยางคอมปาวด์ให้มีลักษณะเป็นแผ่นเพื่อนำไปอัดขึ้นรูปใช้ในงานทดสอบต่อไป

2. นำยางคอมปาวด์ในแต่ละสูตรไป ทำการวัดค่าเวลาในการคงรูป โดยใช้เครื่อง Oscilating disk rheometer (ODR) เพื่อหาระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม

3. ทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 18 เพื่อนำไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ

ตารางที่ 7 ขั้นตอนและเวลาในการบดผสมยาง NR คอมปาวด์

ขั้นตอน	เวลา (min)
บดยาง NR ด้วยเครื่องบดระบบปิด	2
สารตัวเติม pPVC	2
ZnO, Steric acid	2
MBTS, DPG, TMTD	2
Wingstay L	2
Sulfur	3

ตารางที่ 8 ขั้นตอนและเวลาในการบดผสมยาง NBR คอมปาวด์

ขั้นตอน	เวลา (min)
บดยาง NBR ด้วยเครื่องบดระบบปิด	2
Sulfur	3
สารตัวเติม pPVC	2
CTP	2
PBBs	2
ZnO	2



ภาพที่ 18 เครื่องอัดขึ้นรูปยาง

## 2. การทดสอบสมบัติของยาง

### 2.1 การทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ (Rheological properties)

การทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ สามารถทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ดังแสดงในภาพที่ 19 ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 289-1 ค่าความหนืดที่วัดได้เรียกว่า ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดมูนนี่คือ ยางอยู่ภายในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิตามกำหนด งาน โลหะ (Rotor) หมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ  $2 \pm 0.02$  รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ภายในห้องทดสอบคือ  $100^{\circ}\text{C}$  และการหมุนของงาน โลหะที่มียางห่อหุ้มอยู่ ทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ซึ่งมีไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดขนาดของการเคลื่อนที่ดังกล่าวออกมาเป็นหน่วย ที่เรียกว่า มูนนี่วิสคอสซิซิตี (Mooney viscosity; MV) โดยกำหนดให้แรงบิดขนาด  $8.30 \pm 0.02$  นิวตัน-เมตร เทียบเท่ากับค่าความหนืด 100 มูนนี่

โดยการรายงานผลการทดสอบแสดงดังตัวอย่าง

50 ML 1+4 (100°C)

50 M	=	ค่า Mooney Viscosity ของยาง
L	=	งานหมุนขนาดใหญ่ (ถ้าใช้งานหมุนขนาดเล็กให้ใช้อักษร S)
1	=	เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการอุ่นยาง
4	=	เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการทดสอบและวัดค่าความหนืดนั้น
100°C	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ



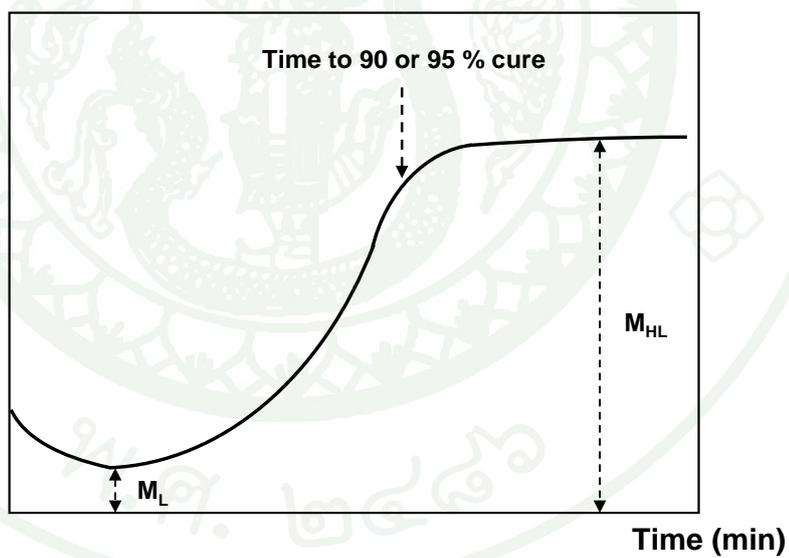
ภาพที่ 19 เครื่องมือนี้ที่ใช้ทดสอบสมบัติการไหลของยาง

## 2.2 การทดสอบลักษณะการคงรูปของยางคอมปาวด์ (Cure characteristic)

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง ได้แก่เครื่อง Oscilating disk rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ISO 3417 ดังแสดงในภาพที่ 20 โดยเครื่อง ODR เป็นเครื่องมือที่อาศัยการแกว่งของจานโลหะ ที่มียางห่อหุ้มอยู่ เริ่มต้นเมื่อยางคอมปาวด์ ได้รับความร้อนยางจะเริ่มอ่อนตัว โดยแรงที่ใช้ในการแกว่งของจานโลหะยังมีค่าที่น้อย แต่เมื่อยางเริ่มเกิดปฏิกิริยา โมเลกุลของยางมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้น ความแข็งของยางเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงที่ใช้ในการแกว่งจานโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 20 เครื่อง ODR ที่ใช้ทดสอบลักษณะการคงรูปของยาง



ภาพที่ 21 ลักษณะการคงรูปของยางที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

จากกราฟที่ได้ สามารถหาแรงบิดและทำให้ทราบเวลาในการคงรูปได้จากสมการที่ 1

$$\text{Torque} = \frac{Y(M_{HL} - M_L) + M_L}{100} \quad (1)$$

เมื่อ	$Y$	=	เปอร์เซ็นต์การคงรูปของยางที่ต้องการ
	$M_{HL}$	=	ค่าแรงบิดต่ำสุด (นิวตัน.เมตร)
	$M_L$	=	ค่าแรงบิดสูงสุด (นิวตัน.เมตร)

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยาง ยางจะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางสมบูรณ์ หมายถึงยางเกิดการวัลคาไนเซชัน 100% และเวลาที่ใช้ไปในการนี้ เรียกว่า 100% vulcanization time หรือ 100% cure time แต่ในทางปฏิบัติจริง พบว่า 100% Cure time เป็นเวลาที่นานเกินไป ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน เนื่องจากยางสามารถเกิดการคงรูปต่อในระหว่างการนำยางออกจากแม่พิมพ์ หรือในขณะที่ใช้งาน ดังนั้นการทำให้ยางคงรูป มักใช้เพียง 90% 95% หรือ 98% cure time ระยะเวลาดังกล่าวถือว่าเป็นเวลาที่เหมาะสม ในการทำให้ยางคงรูป การเลือกใช้เปอร์เซ็นต์การคงรูปต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูป ระบบการทำให้ยางคงรูป และขนาดของชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เป็นปัจจัยในการพิจารณา

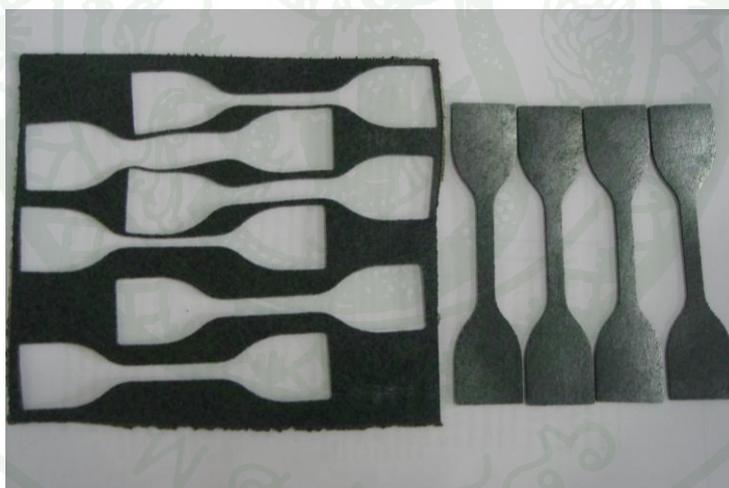
## 2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเมื่อผ่านกระบวนการคงรูป

### 1. ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่ผ่านกระบวนการคงรูป สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ISO 37 (Type1) และ ASTM D 2240 (Die C) โดยนำชิ้นทดสอบที่ได้เมื่อผ่านการอัดขึ้นรูป ขนาด 14x16 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลมดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งใช้ Die ที่มีลักษณะเป็นคัมเบลล์จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงดังแสดงในภาพที่ 24 ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นงานเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 22 เครื่องตัดชิ้นงานยางแบบใช้กำลังลม



ภาพที่ 23 ลักษณะชิ้นงานยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบลล์



ภาพที่ 24 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

## 2. การทดสอบความแข็งของยาง (Hardness)

การทดสอบความแข็งของยาง เป็นการวัดความสามารถในการรักษารูปร่างของยางเมื่อถูกกดภายใต้สภาวะที่กำหนด ยางที่มีความแข็งมากจะมีความต้านทานต่อการกดมาก ความแข็งบ่งบอกถึงการต้านทานต่อแรงกระทำที่กดลงบนผิวหน้าของยาง เครื่องมือวัดความแข็งที่สะดวก และใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นแบบ Spring-loaded pocket durometer หรือที่เรียกว่า Shore Durometer ดังแสดงในภาพที่ 25 ใช้หัวกดชุบแข็ง มาตรฐานการวัดเริ่มตั้งแต่ความแข็งเป็นศูนย์จนถึงค่า 100 โดยการทดสอบความแข็งแบบ Shore A นิยมใช้ในการทดสอบความแข็งของยาง หรือ อีลาสโตเมอร์ ในขณะที่การทดสอบความแข็งแบบ Shore D นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการทดสอบความแข็งของพลาสติก หรือ ยางที่ค่อนข้างแข็ง



ภาพที่ 25 เครื่องทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A

Shore	การใช้/วัสดุ	มาตรฐาน	แรงสปริง นิวตัน (กรัม) ความแข็ง 0-100	ขนาดของหัวกด (มม.) ขนาด/ความสูง
A	สำหรับยางทั่วไปและ วัสดุที่มีความยืดหยุ่น	ASTM D 2240	0.550-8.050 N	ทรงรูปกรวยปลายตัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.79 มม. ทำมุม 35 องศา/2.50±0.04

### 3. การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)

เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอบนผิวของยาง เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า Abrasion tester หรือ Abrader ดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งมีหลายชนิด ขึ้นกับความสัมพันธ์ของการเคลื่อนไหวยาวและตัวขัดสี (Abradant) เป็นการทดสอบโดยผิวหน้าของยางสัมผัสกับผิวหน้าของตัวขัดสี ในขณะที่มีแรงอัดอยู่ ด้วยการหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ทำโดยการวัดปริมาตรหรือน้ำหนักของยางที่ถูกขัดสีออกไปจากผิวเนื้อของชิ้นงานยางทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดไว้ตาม Type Akron มาตรฐาน BS.903 Part A 8 โดยความต้านทานต่อการสึกหรอของยางสามารถวัดได้จากปริมาตรเนื้อยางที่สูญเสียหลังการทดสอบ ดังแสดงในสมการที่ 2



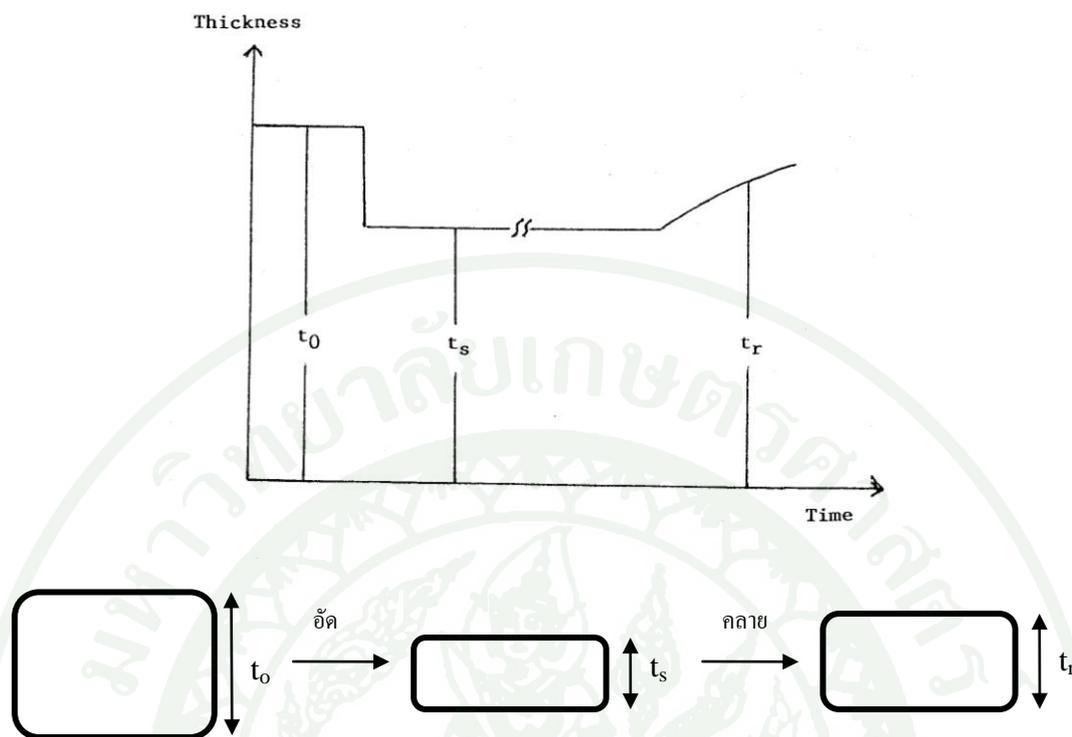
ภาพที่ 26 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

$$V = \frac{M_1 - M_2}{D} \quad (2)$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบที่หายไปต่อจำนวนรอบในการขัด (ลบ.ซม)  
 $M_1$  = น้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (กรัม)  
 $M_2$  = น้ำหนักชิ้นงานหลังทดสอบ (กรัม)  
 $D$  = ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม)

#### 4. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)

การทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง เป็นการทดสอบความสามารถในการคืนตัวของยางหลังจากใช้แรงกระทำ โดยการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด โดยการอัดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 28.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 395 (Method B) วัดความหนาของชิ้นตัวอย่างก่อนทดสอบ ( $t_0$ ) แล้วนำตัวอย่างเข้าไปวางไว้ระหว่างเครื่องมือทดสอบ โดยอัดให้ชิ้นตัวอย่างยุบตัวลงจากเดิมตามที่กำหนด (25%) 9.5 มิลลิเมตร ( $t_1$ ) จากนั้นนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานออกจากเครื่องมือทดสอบทิ้งไว้ 30 นาที จึงนำไปวัดความหนาที่ยางคืนตัวกลับ ( $t_2$ ) แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 27 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางเนื่องจากแรงอัด ดังแสดงในสมการที่ 3



ภาพที่ 27 หลักการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

$$\% \text{ Compression set} = \frac{(t_0 - t_s) \times 100}{(t_0 - t_r)} \quad (3)$$

เมื่อ  $\% \text{ Compression set}$  = เปอร์เซ็นต์ของความหนาที่เปลี่ยนไปต่อความหนาเดิม

$t_0$  = ความหนาเดิมของยาง (มม.)

$t_s$  = ความหนาของยางขณะกด (มม.)

$t_r$  = ความหนาที่ยังคืนตัวกลับเมื่อนำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบ (มม.)



ภาพที่ 28 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อการขูดขีดเนื่องจากแรงอัด

#### 2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางที่ผ่านกระบวนการคงรูป

##### 1. การทดสอบความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน (Oil resistance)

การทดสอบความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D No.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน นำยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมาทำการตัดให้มีขนาด 2 x 2 เซนติเมตร จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนัก ก่อนนำไปแช่ในน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง โดยสามารถคำนวณระดับการบวมตัวได้จากเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักยางดังแสดงในสมการที่ 4



ภาพที่ 29 การทดสอบความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน

$$\text{Change in volume (\%)} = \left[ \frac{(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)}{m_1 - m_2} \right] \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ  $\text{Change in volume (\%)} =$  ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

$m_1 =$  น้ำหนักเริ่มต้นของยางในอากาศ (กรัม)

$m_2 =$  น้ำหนักเริ่มต้นของยางในน้ำ (กรัม)

$m_3 =$  น้ำหนักหลังผ่านการแช่ในน้ำมันของยางในอากาศ (กรัม)

$m_4 =$  น้ำหนักหลังผ่านการแช่ในน้ำมันของยางในน้ำ (กรัม)

## 2. การทดสอบความต้านทานการลามไฟ (Flame resistance)

การทดสอบความสามารถในการติดไฟตามมาตรฐาน UL 94 ซึ่งสามารถทดสอบได้ 2 แบบ คือ แบบ HB TEST และแบบ V TEST

HB TEST คือ วิธีการทดสอบความสามารถในการติดไฟของชิ้นงานตามแนวนอน โดยนำชิ้นงานมาทำการเผาด้วยเปลวไฟ ชิ้นงานตามแนวนอนห่างจากเปลวไฟไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร สัมผัสเปลวไฟ 30 วินาทีแล้วนำเปลวไฟออก

V TEST คือ วิธีการทดสอบความสามารถในการติดไฟของชิ้นงานตามแนวตั้ง โดยใช้เปลวไฟที่มีความแรงเป็น 2 เท่าของ HB TEST ชิ้นงานตามแนวนอนห่างจากเปลวไฟไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร สัมผัสเปลวไฟ 5 วินาทีแล้วนำเปลวไฟออก

การทดสอบในงานวิจัยเป็นแบบ HB TEST คือ การทดสอบความสามารถในการต้านทานการลามไฟในแนวนอน ทำโดยการนำแผ่นยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้วขนาด 14x16 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร นำมาตัดเป็นแผ่นทดสอบยาว 127 มิลลิเมตร และกว้าง 12.7 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละชุดการทดลอง และนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการลามไฟ โดยแต่ละชิ้นงานใช้เวลาในการสัมผัสเปลวไฟ 30 วินาที จากนั้นนำเปลวไฟออกและเริ่มจับเวลาจนกระทั่งชิ้นตัวอย่างเกิดการเผาไหม้จนหมด



ภาพที่ 30 การทดสอบการต้านทานการลามไฟ

## 2.5 การทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมสภาพเมื่อมีการนำไปใช้งานกลางแจ้ง หรืองานภายนอกอาคาร คือแสงแดด ความชื้น และความร้อน การทดสอบนี้ทำขึ้นเพื่อให้ชิ้นทดสอบสัมผัสกับปัจจัยหลักที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพนั้น โดยตรง จึงทราบผลที่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น

### 1. การเสื่อมสภาพทางความร้อน (Heat aging)

วิธีการทำให้ยางเสื่อมสภาพโดยการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยทั่วไปนิยมใช้ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) โดยปกติแล้วการบ่มเร่งด้วยความร้อน สามารถทำการทดสอบที่สภาพบรรยากาศปกติ ตัวกลางที่ให้ความร้อนภายในตู้อบเป็นอากาศร้อนซึ่งหมุนเวียนอยู่ภายในที่ความดันบรรยากาศ การให้ความร้อนต้องสม่ำเสมอทั่วถึง ชิ้นงานทดสอบถูกแขวนในแนวดิ่ง โดยไม่สัมผัสกันและไม่สัมผัสกับด้านข้างของตู้อบ ดังนั้น ผลที่ได้จึงสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของยางที่สัมผัสกับอากาศ เนื่องจากการแพร่ของก๊าซออกซิเจนอย่างรวดเร็วในชั้นยางจะให้ลักษณะการเสื่อมสภาพที่สม่ำเสมอ แต่หากทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงอัตราการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดเทอร์โมออกซิเดชัน (Thermo oxidation) ของยางเร็วกว่าอัตราการแพร่ของก๊าซออกซิเจน จึงเกิดลักษณะการเสื่อมสภาพที่ไม่สม่ำเสมอ ในการทดสอบส่วนใหญ่แล้วนิยมเตรียมชิ้นงานตัวอย่างมากกว่าที่ใช้ผลิตภัณฑ์จริงมาทดสอบ ซึ่งไม่อาจเปรียบเทียบผลจากชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันได้ และอาจเร่งผลการทดสอบให้เร็วขึ้นได้โดยการเพิ่มความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

ขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D573-99 ทำโดยการนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนเข้าเครื่องทดสอบการบ่มเร่งทางความร้อน (Heat aging) โดยนำชิ้นงานเข้าตู้อบอากาศร้อน ในตู้อบบ่มเร่งยาง (Rubber aging oven) ดังแสดงในภาพที่ 31 อุณหภูมิ 100°C เป็น

เวลา 22 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอ ตามลำดับ



ภาพที่ 31 เครื่องทดสอบการบ่มเร่งด้วยความร้อน

2. การทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้เครื่อง QUV Accelerated Weathering

แสงแดดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากแสงแดดที่ตกกระทบพื้นผิวโลก พบว่ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 280 นาโนเมตรเท่านั้นสามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นโลกได้ และความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอัลตราไวโอเลต หรือรังสียูวี (Ultraviolet; UV) นั้นมีพลังงานสูงสามารถทำลายพันธะเคมีในโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ การทดสอบโดยเครื่องเร่งสภาวะ ขึ้นทดสอบจะได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง ยูวีเอ (315-400 นาโนเมตร) หรือ ยูวีบี (280-315 นาโนเมตร) สลับกับความชื้นที่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ เครื่องเร่งสภาวะออกแบบมาให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการทดสอบให้สูงกว่าสภาวะแวดล้อมปกติ หลังจากให้ความร้อนและความชื้นภายในเวลาที่กำหนด จากนั้นนำชิ้นงานออก และนำไปทดสอบด้วยวิธีต่างๆ เทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบ การทดสอบด้วยวิธีเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการสามารถบอกความทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ในระดับหนึ่ง บอกแนวโน้มความคงทนของผลิตภัณฑ์ทำให้เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ได้เหมาะสมกับงานมากยิ่งขึ้น

การทดสอบทำโดยการนำชิ้นงานไปเข้าเครื่องทดสอบ QUV Accelerated Weathering ตามมาตรฐาน ASTM D 4329 เป็นระยะเวลา 300 ชั่วโมง เร่งสภาวะโดยการให้ความร้อนสลับกับความชื้น ความร้อนภายในเครื่องได้จากความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอัลตราไวโอเลต หรือ รังสียูวี (Ultraviolet; UV) ซึ่งมีพลังงานสูงสามารถทำลายพันธะเคมีของยางทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ความชื้นซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่

สำคัญได้จากน้ำในถาดเก็บน้ำด้านล่างของตัวเครื่อง ความร้อนจะทำให้น้ำกลายเป็นไอจนความชื้นถึงระดับอิ่มตัว เมื่อไอน้ำกระทบกับความเย็นที่ผิวของชิ้นงานจะควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำมาเกาะที่ชิ้นงาน



ภาพที่ 32 เครื่องทดสอบการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

## ผลและวิจารณ์

### 1. อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติการไหล และการคงรูปของยาง NR และยาง NBR

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติการไหลของยาง NR และยาง NBR โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer แสดงดังตารางที่ 10 จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC ในยาง NR และยาง NBR ค่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่อนุภาค pPVC แทรกเข้าไปในโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากในขณะไหล และแรงเสียดทานที่ได้รับ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดอนุภาค pPVC เมื่อปริมาณ pPVC ในยางเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค pPVC กับโมเลกุลของยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NBR พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดของยาง NBR มากกว่ายาง NR ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาค pPVC เกิดการยึดเหนี่ยวในยาง NBR ได้ดีกว่าในยาง NR เนื่องจากความมีขั้ว (Polarity) ของ pPVC และยาง NBR รวมทั้งการที่ pPVC มี Solubility parameter ที่ใกล้เคียงกับยาง NBR (Solubility parameter ของ PVC เท่ากับ  $9.6 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$  ยาง NBR เท่ากับ  $9.55 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$  และยาง NR เท่ากับ  $8.25 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ) ส่งผลต่อความสามารถในการเข้าได้ของยาง NBR และ pPVC นอกจากนี้ยังทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์ โดยเครื่อง Oscilating disk rheometer ค่าที่วัดได้แสดงถึงค่าแรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาจากระยะเวลาในการคงรูป 90 เปอร์เซ็นต์ (90% Cure time) เป็นค่าที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบผล จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NBR ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NR ระยะเวลาในการคงรูปมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่ยาง NR มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่ายาง NBR รวมทั้งการที่ pPVC มีเขม่าดำผสมอยู่ในปริมาณ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) (ภาคผนวก ก) ทำให้ยางมีสมบัติการนำความร้อนที่ดีขึ้น ในขณะที่ยาง NBR ระยะเวลาในการคงรูปโดยทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับปริมาณบิวตะไดอินที่อยู่ในโครงสร้างของยาง NBR ซึ่งการเพิ่มปริมาณ pPVC เข้าไปยังยังการทำปฏิกิริยาระหว่างกำมะถัน และ ส่วนของบิวตะไดอิน ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแตกต่างแรงบิดดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าค่าความแตกต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NBR นั่นคือค่าความแตกต่างแรงบิดสามารถบ่งชี้ความหนาแน่นโครงสร้างร่างแห และ ประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยาของกำมะถัน

**ตารางที่ 10** ค่าความหนืดมูนนี่ และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ NR และ NBR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Mooney viscosity		90 % cure time (min)	
	NR	NBR	NR	NBR
0	37.7	43.1	5.01	7.58
30	39.4	42.1	4.48	9.75
50	40.2	47.8	4.44	10.67

**ตารางที่ 11** ค่าความแตกต่างแรงบิดของยางคอมปาวด์ NR และ NBR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC ต่างๆ กัน

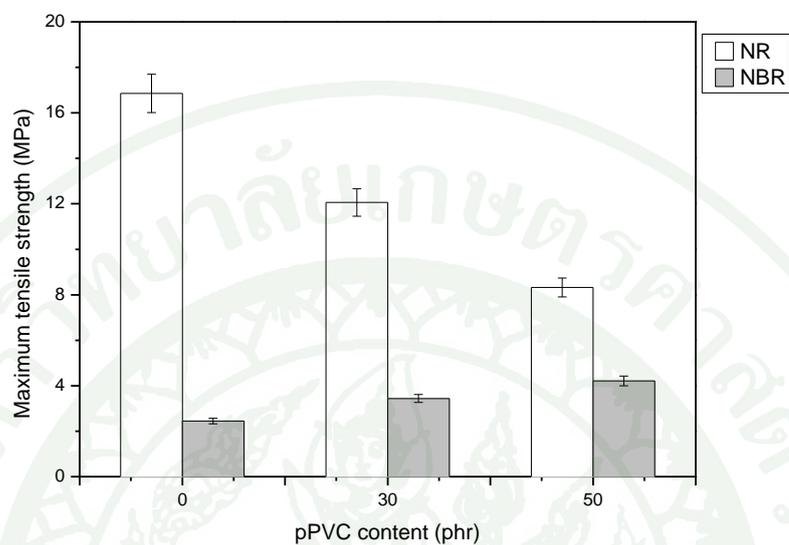
pPVC content (phr)	NR			NBR		
	Max	Min	Max-min	Max	Min	Max-min
	torque	torque	torque	torque	torque	torque
0	57.7	7.3	50.4	70.9	6.02	64.88
30	50.1	7.7	42.4	51.73	6.24	45.49
50	47.6	7.8	39.8	47.49	6.39	41.1

## 2. อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง NR และยาง NBR

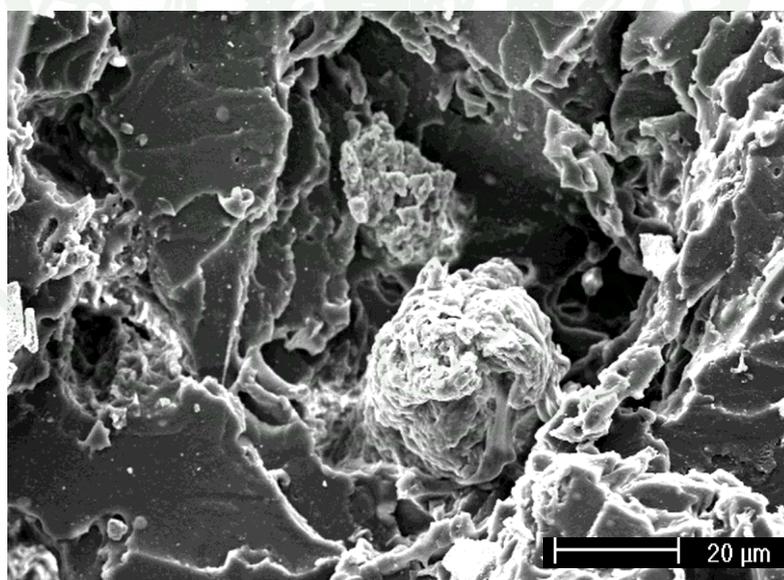
### 2.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

ภาพที่ 33 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของยาง NR และ NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน จากผลการทดสอบพบว่า ยาง NR มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่สูงกว่ายาง NBR ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยาง NR สามารถเกิดผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืดดึง (พงษ์ธร, 2547) และเมื่อปริมาณ pPVC ที่ผสมในยาง NR เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก pPVC ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่ายาง NR แต่สูงกว่ายาง NBR (รัชนี, 2551) รวมทั้งการที่ pPVC และยาง NBR มีความเป็นขั้ว ในขณะที่ยาง NR ไม่มีความเป็นขั้ว (Non-polarity) ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่าง pPVC และยาง NR รวมถึงความสามารถในการกระจายตัว (Dispersion) ของอนุภาค pPVC ภายในเนื้อยาง โดยจากการวิเคราะห์พื้นผิวของยาง NR ที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง SEM (Scanning electron microscope) ซึ่งแสดง

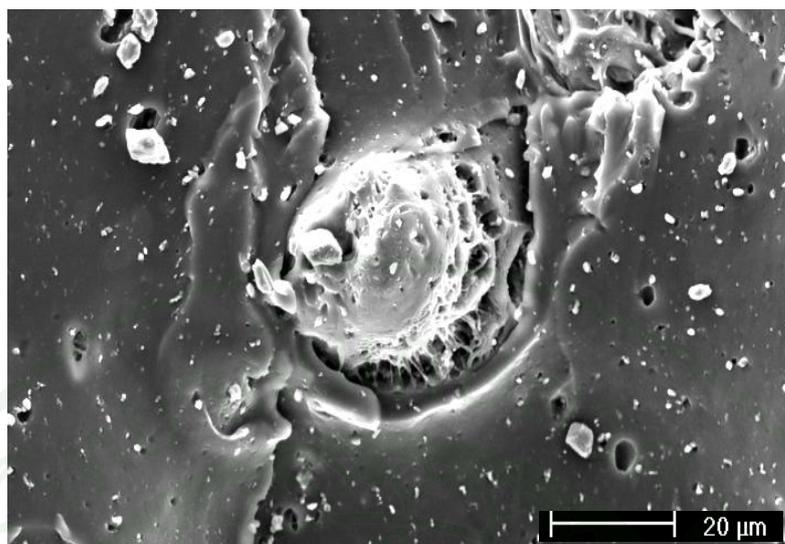
ลักษณะการหลุดออกของอนุภาค pPVC ภายในเนื้อยาง NR ดังแสดงในภาพที่ 34 และลักษณะการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของ pPVC ภายในเนื้อยาง NBR ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 33 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน



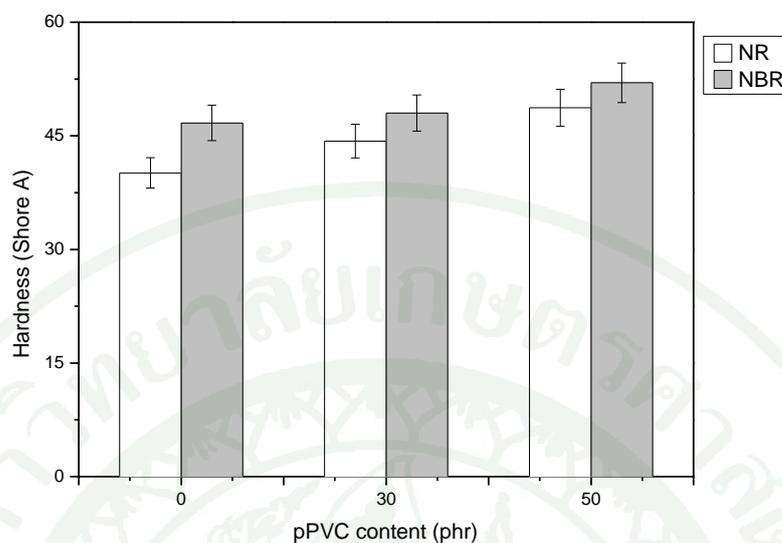
ภาพที่ 34 ลักษณะการหลุดออกของอนุภาค pPVC ในยาง NR



ภาพที่ 35 ลักษณะการขีดเกาะของอนุภาค pPVC ในยาง NBR

## 2.2 สมบัติด้านความแข็ง (Hardness)

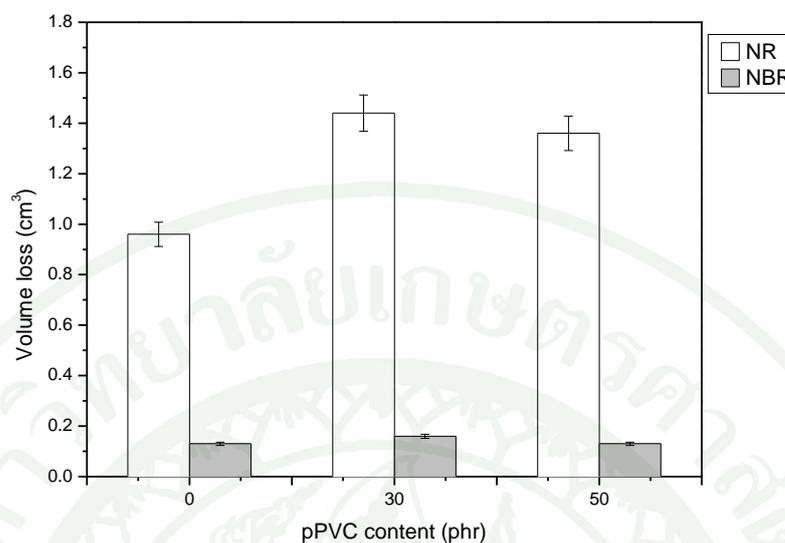
เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 36 พบว่า ยาง NBR มีความแข็งที่สูงกว่ายาง NR เนื่องจากยาง NBR มีอะคริโลไนไตรล์อยู่ใน โครงสร้างโมเลกุล นั่นคือปริมาณอะคริโลไนไตรล์ยิ่งมาก ยาง NBR ยิ่งมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ยัง พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม เป็นการลดสัดส่วนของเฟสยาง ส่งผลให้สมบัติความเป็นอีลาสติก (Elastic properties) ลดลง หรือเรียกว่าเป็น ปปรากฏการณ์เจือจาง (Dilution effect) รวมทั้งการที่ pPVC มีความแข็งที่มากกว่ายาง NR และยาง NBR (รัชนี้, 2551) และการที่มีเขม่าดำผสมอยู่ใน pPVC อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ยางที่ผสม pPVC มีความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 36 ค่าความแข็งของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน

### 2.3 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)

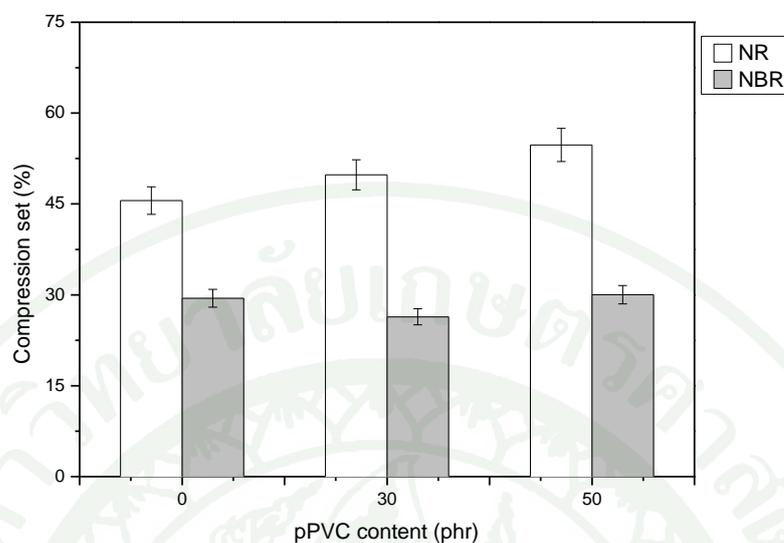
หากพิจารณาสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ซึ่งแสดงในรูปของการสูญเสียปริมาตรภายหลังจากการทดสอบโดยการขัดสีดังแสดงในภาพที่ 37 พบว่ายาง NBR มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่สูงกว่ายาง NR และเมื่อปริมาณ pPVC ในยาง NBR เพิ่มมากขึ้น สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องจากโดยทั่วไปแล้วยาง NBR มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่สูง ดังนั้นอิทธิพลของการผสม pPVC จึงไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอในยาง NBR ในขณะที่หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอในยาง NR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ pPVC สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความไม่มีขั้วของยาง NR และความมีขั้วของ pPVC ส่งผลต่อความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค pPVC และยาง NR ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



ภาพที่ 37 ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน

#### 2.4 สมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)

จากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ซึ่งแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน ภายหลังจากการถูกอัดด้วยแรงคงที่ ณ อุณหภูมิทดสอบ 100 °C เป็นเวลานาน 22 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 38 พบว่ายาง NR มีสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ที่ต่ำกว่ายาง NBR โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องจากยาง NBR มีสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ดี รวมทั้งสามารถต้านทานต่อความร้อนได้สูงถึง 125 °C (โดยขึ้นอยู่กับปริมาณอะครีโลไนไตรล์ที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุล) ซึ่งการเพิ่มปริมาณ pPVC อาจไม่ส่งผลต่อความต้านทานการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NBR อย่างไรก็ตามการลดลงของความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NR เมื่อผสม pPVC ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น อาจมีสาเหตุมาจาก pPVC เป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกซึ่งแสดงสมบัติความเป็นวิสคัส (Viscous property) ที่มากกว่าสมบัติความเป็นอีลาสติก นอกจากนี้การที่ pPVC เกิดปรากฏการณ์เจลเลชัน (Gelation phenomenon) ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกลดลง ดังนั้นการผสม pPVC ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ความยืดหยุ่นในยาง NR มีแนวโน้มลดลง

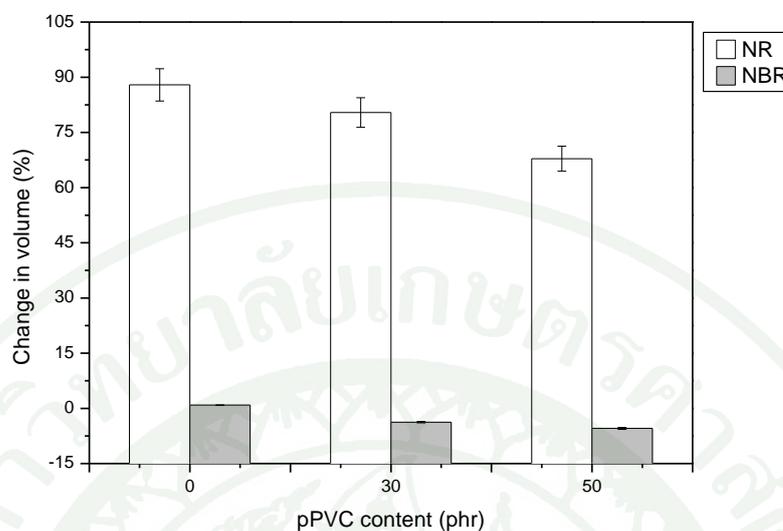


ภาพที่ 38 เปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน

### 3. อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของยาง NR และยาง NBR

#### 3.1 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน (Oil resistance)

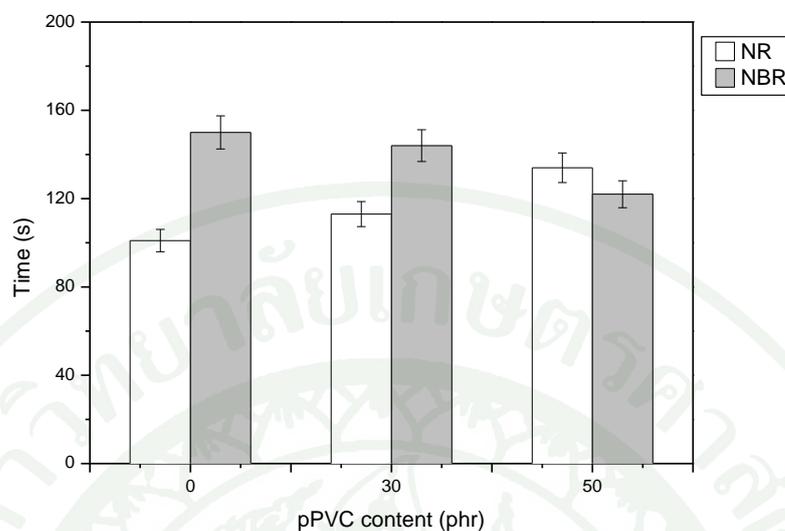
หากพิจารณาสมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน ซึ่งแสดงในรูปของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร ภายหลังจากทดสอบโดยการแช่ในน้ำมัน เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 39 พบว่า ยาง NR มีสมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน ไม่คืนกลับมาเมื่อเทียบกับยาง NBR กล่าวคือ ยาง NR เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยเฉลี่ยเท่ากับ 87.92 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ยาง NBR เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยเฉลี่ยประมาณ 0.87 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากความไม่มีขั้วของยาง NR ในขณะที่ยาง NBR มีขั้วที่ค่อนข้างสูง จึงทนต่อน้ำมัน ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี และนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC แนวโน้มการบวมพองในน้ำมันมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NR ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นขั้วของ pPVC และการที่ pPVC มี Solubility parameter ที่มากกว่ายาง NR และใกล้เคียงกับยาง NBR ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการบวมพองในน้ำมันได้ดี ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ pPVC จึงช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันในยาง NR และยาง NBR และนอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการหดตัวของยาง NBR ภายหลังจากการแช่ในน้ำมัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากการละลายของสารเคมีบางชนิดที่ผสมลงไปนยาง NBR



**ภาพที่ 39** ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรภายหลังผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน

### 3.2 สมบัติความต้านทานต่อการลามไฟ (Flame resistance)

หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR และยาง NBR ดังแสดงในภาพที่ 40 พบว่ายาง NBR มีสมบัติการต้านทานการลามไฟที่ดีกว่ายาง NR ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยาง NBR มีหมู่ไซยาไนด์ (-CN) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ส่งผลต่อความสามารถในการทนต่อความร้อนได้ดี และพบว่าเมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มมากขึ้น สมบัติความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NBR ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอะตอมคลอรีนของ pPVC เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับไซยาไนด์ของยาง NBR เกิดการเชื่อมโยงแบบขั้ว (Polar-polar interaction) ทำให้อะตอมคลอรีนหลุดออกไปได้ยาก รวมทั้งการเกิดเฉื่อยในยาง NBR พบว่าการเกิดเฉื่อยส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการลามไฟดีขึ้น แต่เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ pPVC หรือการลดปริมาณยาง NBR ทำให้การเกิดเฉื่อยปกคลุมผิวหน้าชิ้นงานลดลง ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการลามไฟมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ในยาง NR เมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการลามไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของ pPVC สามารถเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) หรือก๊าซคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ปกคลุมผิวหน้าของชิ้นงานป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับเปลวไฟ ทำให้สามารถต้านทานการลามไฟได้



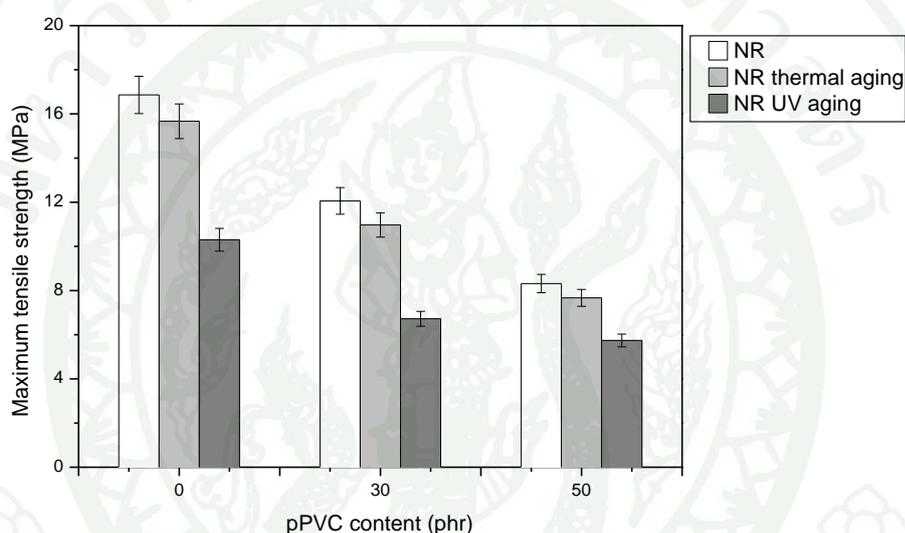
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน

#### 4. อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตของยาง NR และยาง NBR

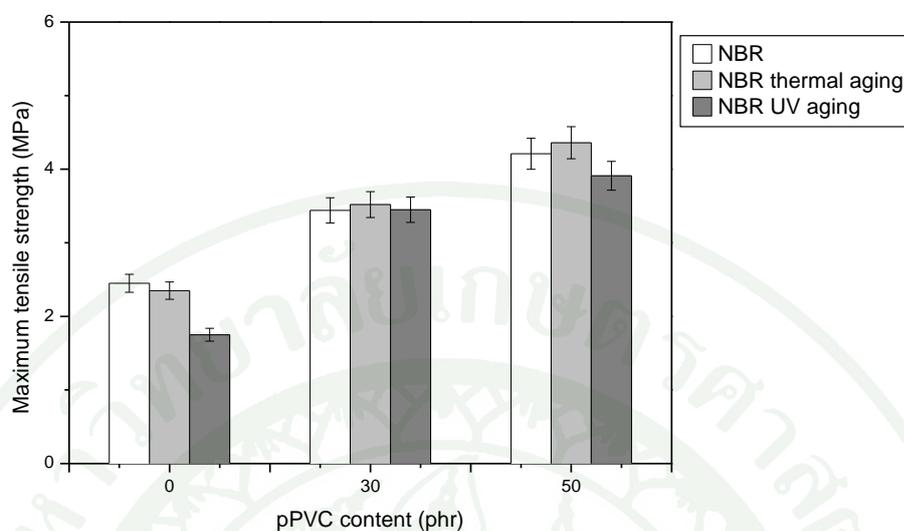
##### 4.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตของยาง NR และยาง NBR ดังแสดงในภาพที่ 41 และภาพที่ 42 โดยพิจารณาจากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดภายหลังจากการบ่มเร่ง พบว่ายาง NR และยาง NBR ที่ไม่ผสมสารตัวเติม pPVC ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งการลดลงของความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในยาง NR ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง NR ทำให้เกิดการขาด หรือการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) ที่บริเวณพันธะคู่ และที่บริเวณพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบการวัลคาไนซ์แบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization; CV) ของยาง NR เมื่อผ่านการบ่มเร่งในสภาวะที่รุนแรง เช่นการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในขณะที่ในยาง NBR สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่ยาง NBR เกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน ที่เรียกว่า Cyclization และยาง NBR มีอะครีโลไนไตรล์อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล รวมทั้งปริมาณพันธะคู่ในยาง NBR น้อย ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพได้เป็นอย่างดี และหากพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตัวเติม pPVC พบว่ามีแนวโน้มทำให้สมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตของยาง NR

และยาง NBR ดีขึ้น (โดยพิจารณาจากอัตราส่วนการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดก่อนและหลังการบ่มเร่ง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NR นั่นคืออิทธิพลของการเพิ่มปริมาณ pPVC มีผลต่อความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตในยาง NR มากกว่าในยาง NBR ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความต้านทานการเสื่อมสภาพเมื่อเพิ่มปริมาณ pPVC อาจเนื่องจาก pPVC เกิดปรากฏการณ์เจลเลชั่น ก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ pPVC รวมทั้งการที่สารพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เกิดการสลายตัว ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ pPVC เพิ่มขึ้น (รัชณี, 2551) ดังนั้นเมื่อปริมาณสารตัวเติม pPVC เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตดีขึ้น



ภาพที่ 41 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

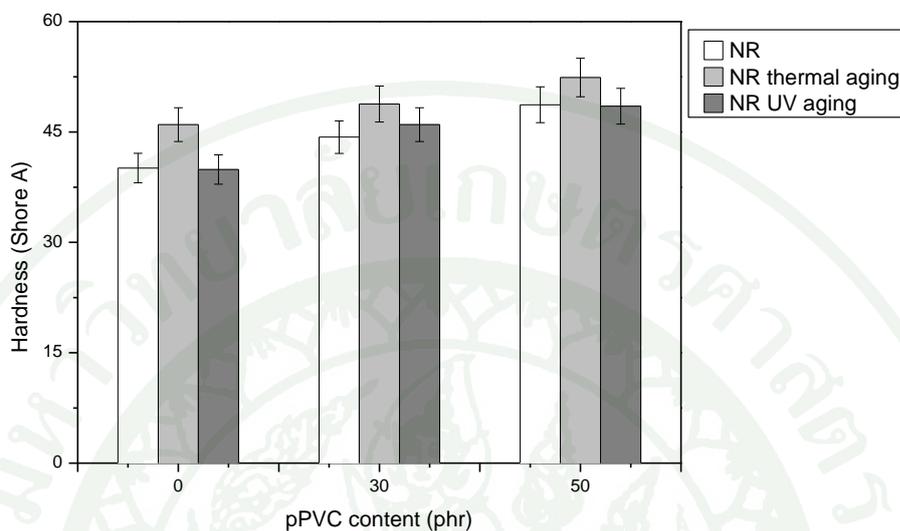


ภาพที่ 42 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

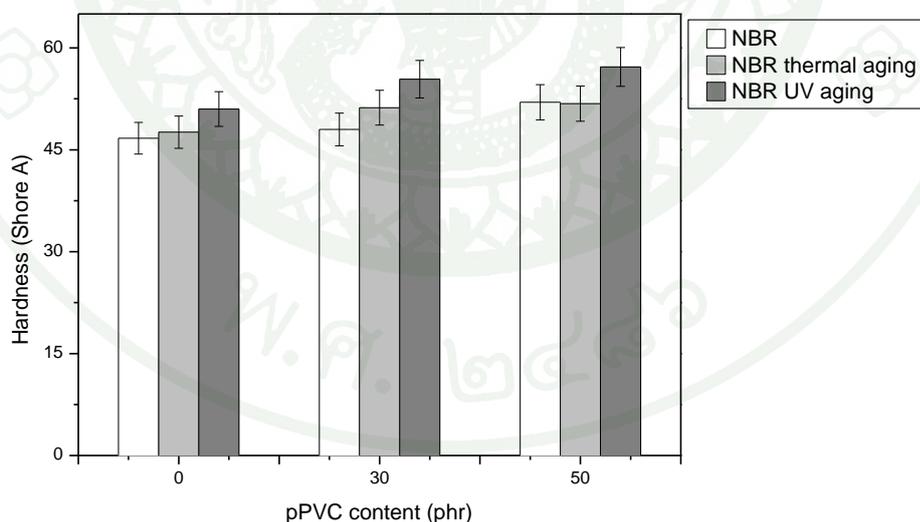
#### 4.2 สมบัติด้านความแข็ง (Hardness)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของยาง NR และยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต ดังแสดงในภาพที่ 43 และภาพที่ 44 พบว่าค่าความแข็งของยาง NR และยาง NBR มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NR ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NR และยาง NBR ค่าความแข็งไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งเนื่องจากการเสื่อมสภาพของยาง NR ส่งผลให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่น ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่เสถียรต่อความร้อนของพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิก โดยอาจเกิดพันธะเชื่อมขวางใหม่เป็นพันธะเชื่อมขวางแบบมอนอและไดซัลฟิดิกเช่นเดียวกับในยาง NBR โดยการเสื่อมสภาพของยาง NBR จะเกิดการเชื่อมขวางใหม่มากกว่าการขาดของสายโซ่โมเลกุล (Ciullo, 1996) รวมทั้งเกิดการเชื่อมโยงแบบ Cyclization ส่งผลให้ยาง NBR มีความยืดหยุ่นลดลง และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในขณะที่ความแข็งของยาง NR ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของยาง NR ที่ผ่านการบ่มเร่งในสภาวะที่รุนแรง โดยเกิดจากอิทธิพลของการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้ยางมีความแข็งลดลง และการเชื่อมขวางใหม่ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองปัจจัยอาจเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน จึงอาจส่งผลให้ยาง NR มีความแข็งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC ค่าความแข็งของยาง NR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในระบบมีสารตัวเติม pPVC ซึ่งมีความแข็งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์เจลเลชัน และการสลายตัวของพลาสติกไซเซอร์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในขณะที่การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC ไม่ส่งผลต่อความแข็งของยาง NBR ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความสามารถในการต้านทานการ

เสื่อมสภาพของยาง NBR มีอิทธิพลมากกว่า ปรากฏการณ์เจลเลชั่น และการสลายตัวของพลาสติกไซเซออร์ที่ เกิดขึ้นใน pPVC



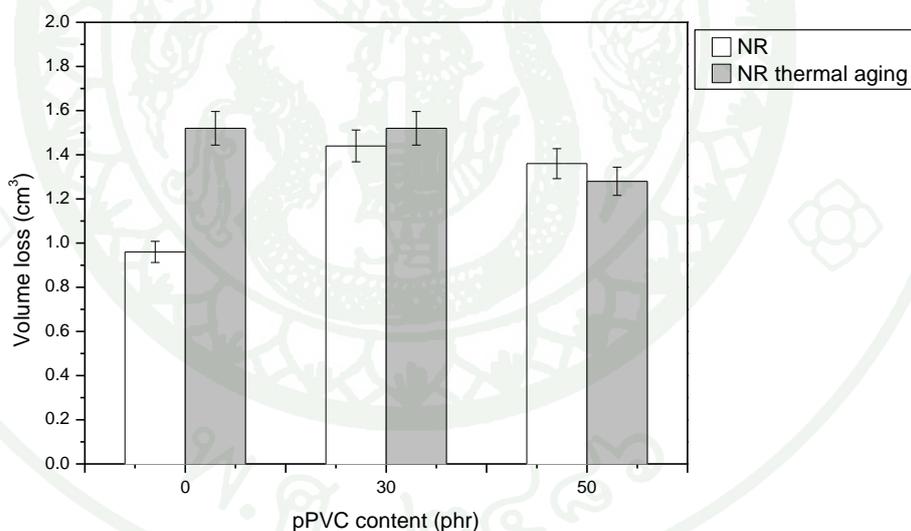
ภาพที่ 43 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต



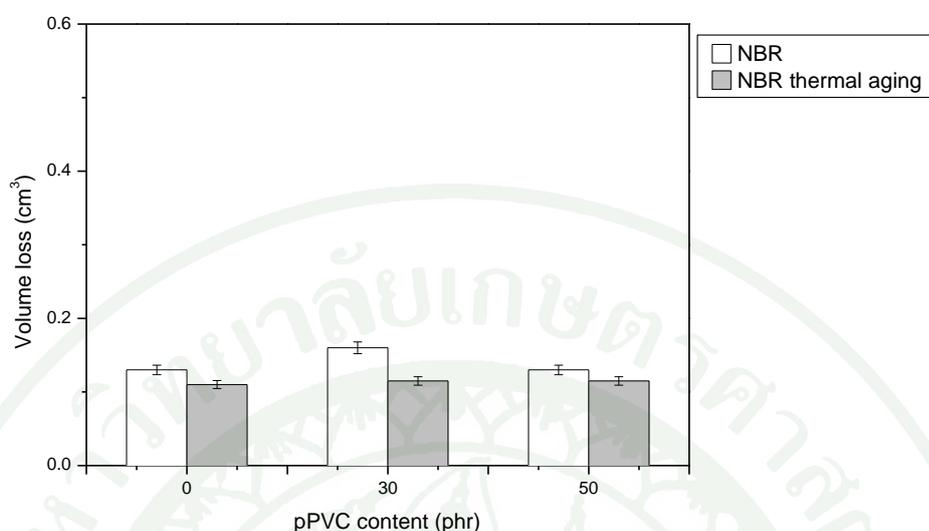
ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

#### 4.3 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)

หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง NR และยาง NBR โดยพิจารณาจากสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 45 และภาพที่ 46 พบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ยาง NR ที่ไม่ผสมสารตัวเติม pPVC ให้สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของยาง NR ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC ในยาง NR พบว่าความต้านทานต่อการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์เจลเลชั่นของ pPVC รวมทั้งการสลายตัวของสารพลาสติกไซเซอร์ ก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของ pPVC ส่งผลให้ยาง NR ที่ผสม pPVC มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และนอกจากนี้จากผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยาง NBR เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากยาง NBR มีความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดี ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NBR สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็ง ตามลำดับ



ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน



ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NBR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่ง และไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

## 5. อิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะ (Compatibilizer) และสารเชื่อมประสาน (Coupling agent) ที่มีต่อสมบัติของยาง NR

จากการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม pPVC ที่มีต่อสมบัติของยาง NR ทำให้ทราบปัญหาในเรื่องของความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างยาง NR และสารตัวเติม pPVC ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของยาง ENR และยาง CR เพื่อใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะ และยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ MAH เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างยาง NR กับสารตัวเติม pPVC โดยปริมาณสารตัวเติม pPVC ที่ใช้ในการศึกษาคือ pPVC เท่ากับ 30 phr (NR+pPVC30)

### 5.1 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติการไหล และการคงรูปของยาง NR

ตารางที่ 12 และ 13 แสดงผลการทดสอบค่าความหนืดมูนีและระยะเวลาคงรูปที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของยาง NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR CR และ MAH ในปริมาณต่างๆ กัน จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในยาง NR เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดมูนีของยาง NR มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง CR ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ยาง NR มีความหนืดสูงกว่ายาง CR แต่ต่ำกว่ายาง ENR (ความหนืดมูนีของยาง NR เท่ากับ 77.2 ยาง CR เท่ากับ 74.5 และยาง ENR เท่ากับ 81.7) ทั้งนี้การลดลงของค่าความหนืดมูนีเมื่อผสมยาง ENR แสดงให้เห็นว่า แรงเฉือนในขณะบดผสมมีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของยาง ENR มากกว่ายาง CR ให้ความหนืดมูนีลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ MAH

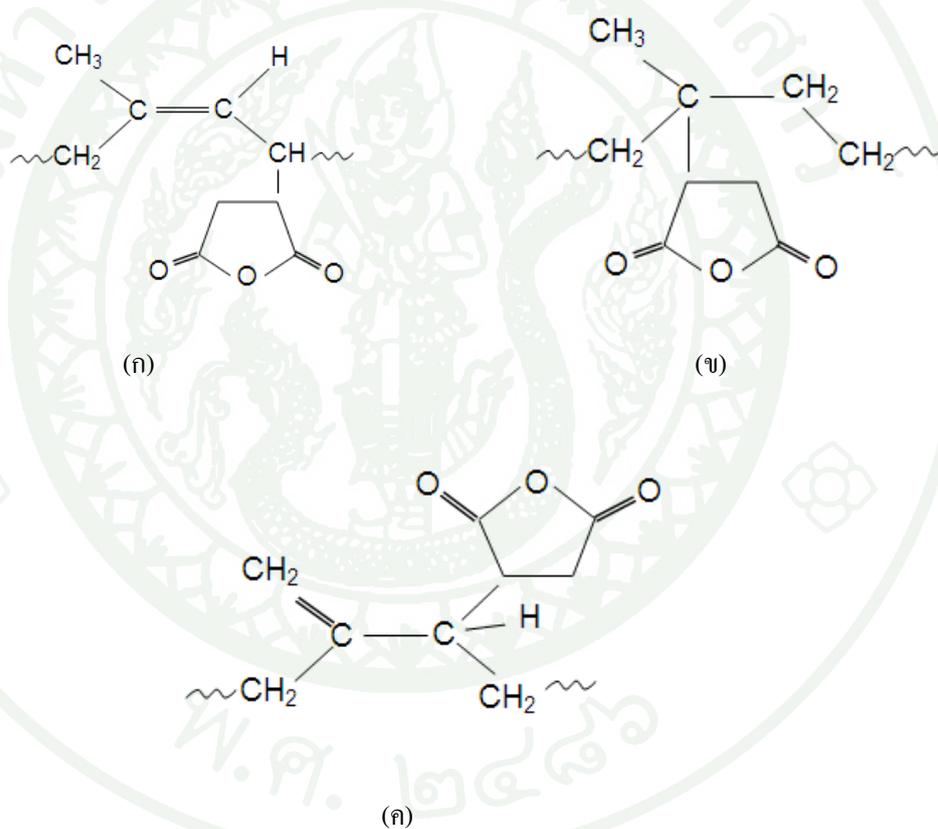
ส่งผลให้ความหนืดมูนนี้มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้การผสม MAH ที่มากเกินไป อาจทำให้ MAH ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ส่งผลให้ความหนืดลดลง และหากพิจารณาระยะเวลาในการคงรูปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ ENR ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณของ CR และ MAH ระยะเวลาในการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การลดลงของระยะเวลาในการคงรูปเมื่อผสมของ ENR อาจมีสาเหตุจากการที่ของ ENR มีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ที่มีสภาพขั้ว โดยสามารถให้อิเล็กตรอนเข้าไปสู่พันธะคู่ในหน่วยของไอโซพรีน ทำให้พันธะคู่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Sedequi, 1999) ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปสั้นลง ในขณะที่ของ CR มีอะตอมคลอรีนที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity; EN) สูง ทำให้พันธะคู่ที่อยู่ใกล้เคียงไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปมีค่าเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งมีความเป็นไปได้ที่ของ CR อาจเกิดปฏิกิริยากงรูปได้โดยซิงค์ออกไซด์ (อิทธิพล, 2551) ทำให้ในระบบของของ NR มีสารกระตุ้นลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปนานขึ้น และในกรณีการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการคงรูปเมื่อผสม MAH อาจเนื่องมาจาก MAH สามารถเกิดปฏิกิริยาตรงบริเวณพันธะคู่ของของ NR ทำให้พันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของของ NR ลดลง รวมทั้งการที่ MAH เข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของของ ทำให้ก้ำมะถันเข้าไปทำปฏิกิริยากับของได้ยากขึ้น ซึ่งความเป็นไปได้ในการยึดเกาะของ MAH บนสายโซ่โมเลกุลของของ NR แสดงดังภาพที่ 47 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของเจริญ และคณะ (2548) ที่พบว่าการใช้ MAH ในปริมาณที่มากขึ้นอาจหน่วงปฏิกิริยาการคงรูปของของ และหากพิจารณาค่าความแตกต่างแรงบิด ดังแสดงในตารางที่ 14 และ 15 พบว่าค่าความแตกต่างแรงบิดเมื่อปริมาณของ ENR เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ในของ CR และ MAH มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณ MAH เพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าความแตกต่างแรงบิดสามารถบ่งชี้ความหนาแน่น โครงสร้างร่างแห และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากงรูปของของได้ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

**ตารางที่ 12** ค่าความหนืดมูนนี้ และระยะเวลาในการคงรูปของของคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสมของ ENR และของ CR ในปริมาณต่างๆ กัน

Compatibilizer content (phr)	Mooney viscosity		90% cure time (min)	
	ENR	CR	ENR	CR
0	39.4	39.4	5.01	5.01
5	33.8	38.2	4.5	4.53
10	27.9	29.1	4.18	5.53
15	31.2	31.4	3.52	7.22

ตารางที่ 13 ค่าความหนืดมูนนี่ และระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสม MAH ใน ปริมาณต่างๆ กัน

MAH content (phr)	Mooney viscosity	90 % cure time (min)
0	39.4	5.01
0.5	37.06	7.58
1.5	37.49	13.67
2.5	38.78	13



ภาพที่ 47 ความเป็นไปได้ของการยึดเกาะของ MAH บนสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง NR (ซีดีไซซิคะห์ และคณะ, 2550)

(ก) และ (ข) การยึดเกาะที่เกิดจากปฏิกิริยา Free radical mechanism

(ค) การยึดเกาะที่เกิดจากปฏิกิริยา Diels-Alder reaction

ตารางที่ 14 ค่าความแตกต่างแรงบิดของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน

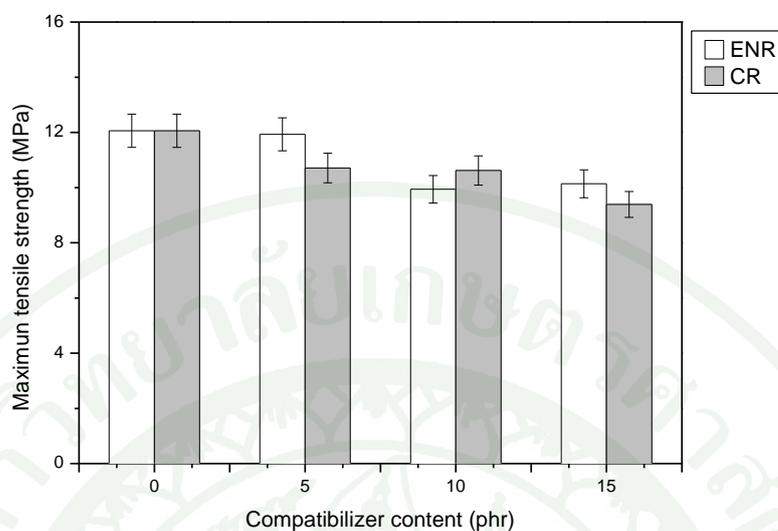
Compatibilizer content (phr)	ENR			CR		
	Max	Min	Max-min	Max	Min	Max-min
	torque	torque	torque	torque	torque	torque
0	50.1	7.7	42.4	50.1	7.7	42.4
5	49	7.4	41.6	48.6	7	41.6
10	48	5.5	42.5	46	4.5	41.5
15	48.3	7.2	41.1	45.1	5.4	39.7

ตารางที่ 15 ค่าความแตกต่างแรงบิดของยางคอมปาวด์ NR+pPVC30 ที่ผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน

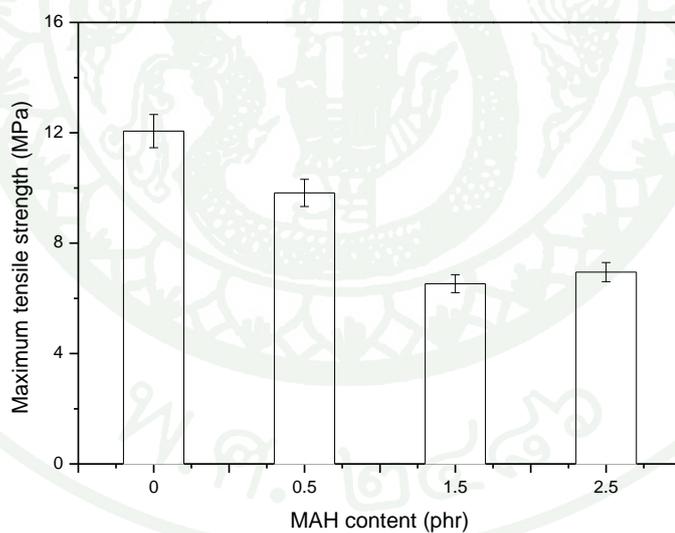
MAH conten (phr)	Max torque	Min torque	Max-min torque
0	50.1	7.7	42.4
0.5	32.21	6.86	25.35
1.5	28.28	7.9	20.38
2.5	28.33	8.59	19.74

## 5.2 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR

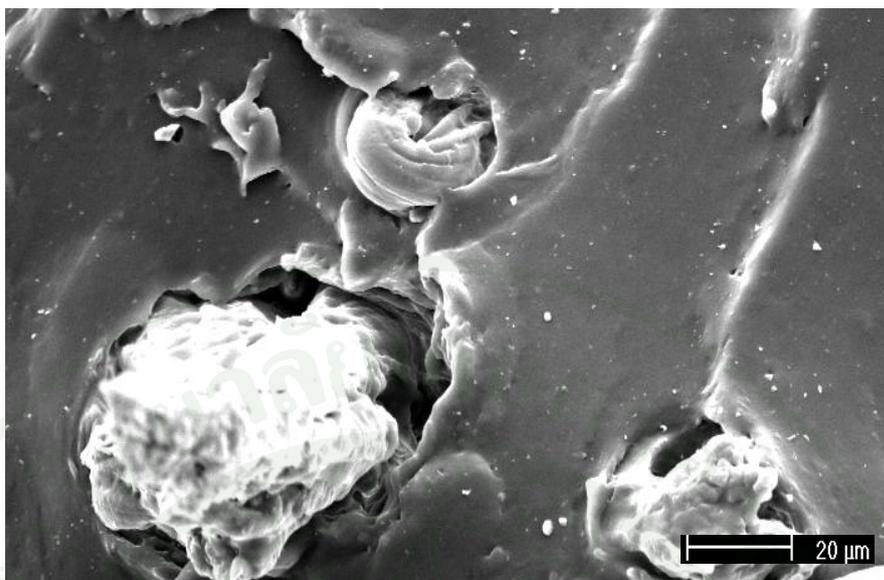
อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC 30 phr แสดงในภาพที่ 48 และภาพที่ 49 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยาง ENR มีความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่ายาง NR โดยยาง ENR มีหมู่เอพอกไซด์อยู่ในสายโซ่โมเลกุลเช่นเดียวกับการผสม MAH ซึ่งเกิดเป็นหมู่ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (Succinic anhydride) เกาะอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยางไม่สามารถแตกสลายได้เมื่อถูกยืดดึง ในขณะที่ในยาง CR ถึงแม้ว่าสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกยืดดึง แต่ความต้านทานต่อแรงดึงยังคงมีค่าน้อยกว่ายาง NR ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH จึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR มีแนวโน้มลดลง และจากภาพที่ 50 ภาพที่ 51 และภาพที่ 52 แสดงลักษณะการหลุดออกของอนุภาค pPVC ภายในเนื้อยาง NR เมื่อผสมยาง ENR ยาง CR ที่ปริมาณ 15 phr และผสม MAH ที่ปริมาณ 1.5 phr โดยการวิเคราะห์พื้นผิวของยางหลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง SEM



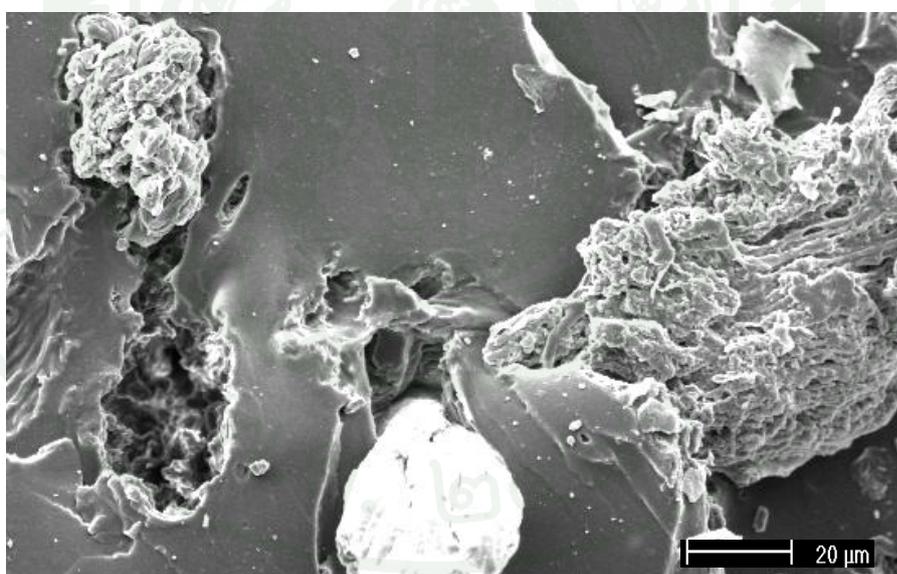
ภาพที่ 48 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน



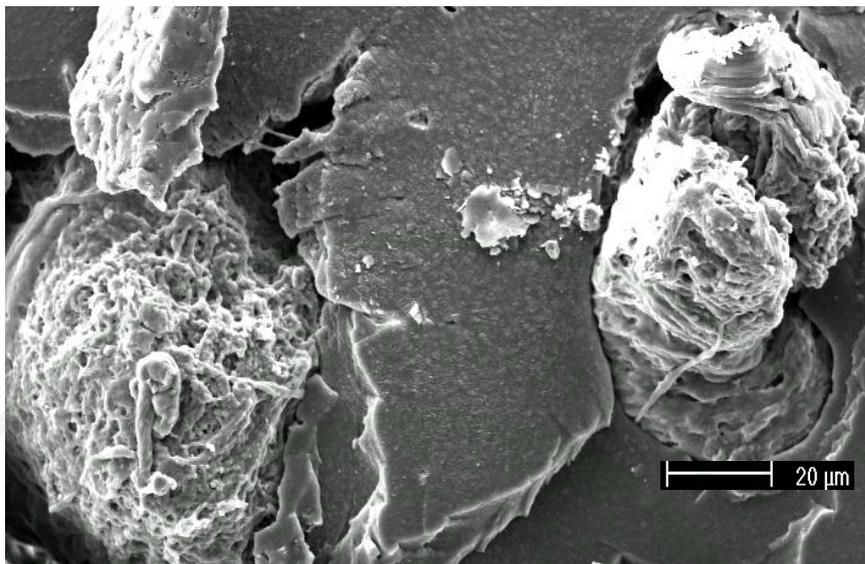
ภาพที่ 49 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 50 ลักษณะพื้นผิวของยาง NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR เมื่อผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง



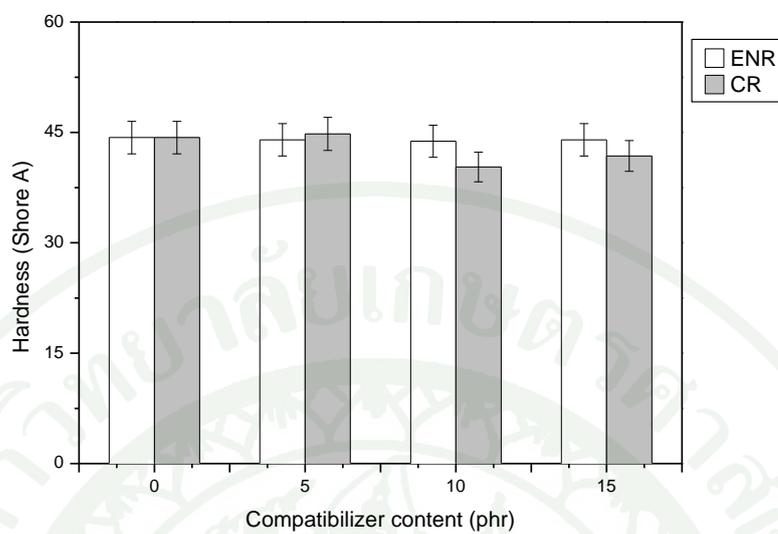
ภาพที่ 51 ลักษณะพื้นผิวของยาง NR+pPVC30 ที่ผสมยาง CR เมื่อผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง



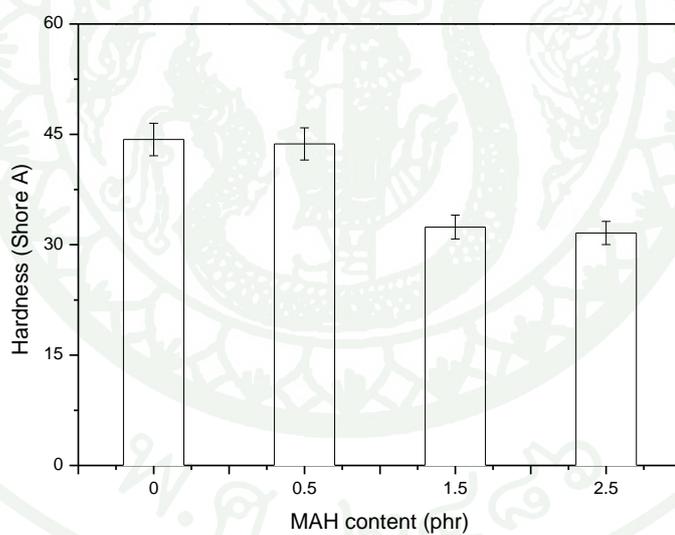
ภาพที่ 52 ลักษณะพื้นผิวของยาง NR+pPVC30 ที่ผสม MAH เมื่อผ่านการทดสอบ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

### 5.3 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ต่อสมบัติด้านความแข็งของยาง NR

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 ที่ผสมยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 53 และภาพที่ 54 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR ความแข็งมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับค่าความแตกต่างแรงบิด กล่าวคือค่าความแตกต่างแรงบิด มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผสมยาง ENR ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความแข็งจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นโครงสร้างร่างแห เช่นเดียวกับในกรณีของยาง CR และ MAH ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง CR ความแข็งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่ยาง CR มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูงของคลอรีนอะตอม รวมทั้งประสิทธิภาพในการคงรูป โดยพิจารณาจากความแตกต่างแรงบิดที่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณ MAH ส่งผลให้ความแข็งมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก เนื่องจากการที่ MAH อยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยางทำหน้าที่ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของกำมะถัน รวมทั้งพันธะคู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาของยาง NR ลดน้อยลงเนื่องจากการเข้าทำปฏิกิริยาของ MAH ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้ปริมาณโครงสร้างร่างแหลดลง ส่งผลให้ความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ MAH เพิ่มขึ้น



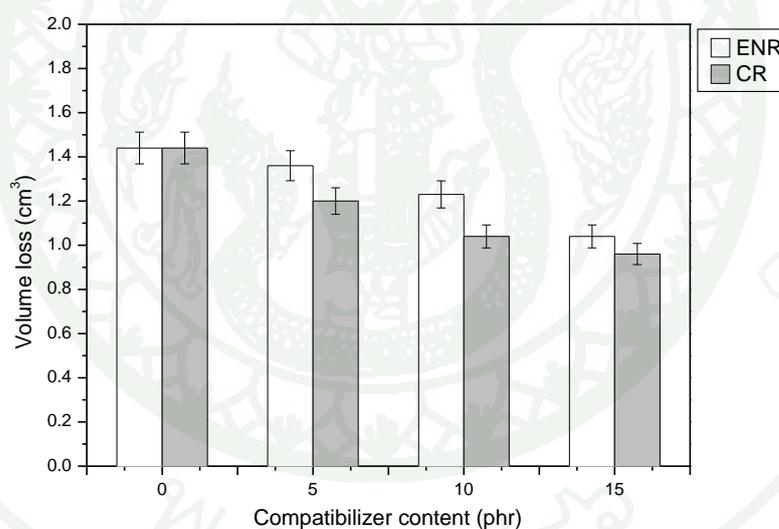
ภาพที่ 53 ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน



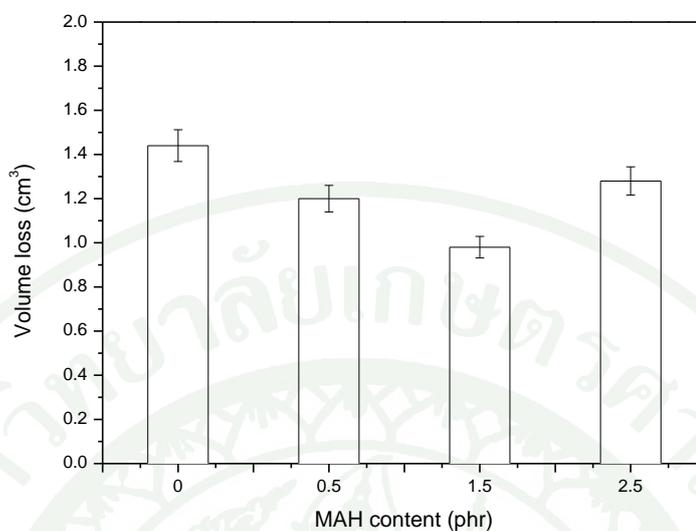
ภาพที่ 54 ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน

#### 5.4 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง NR

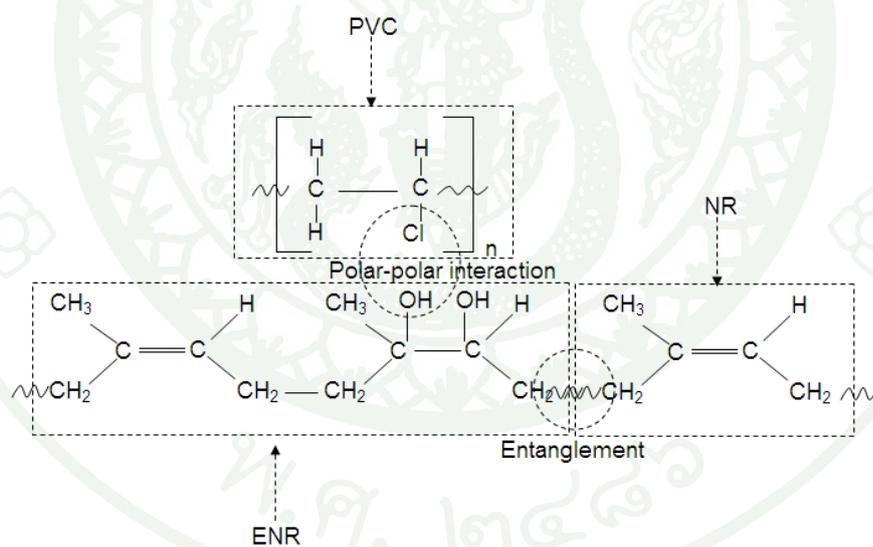
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง NR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC 30 phr ดังแสดงในภาพที่ 55 และภาพที่ 56 โดยแสดงในรูปของการสูญเสียปริมาตรภายหลังจากการขัดสี พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ความต้านทานต่อการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยาง ENR ยาง CR และ MAH เพิ่มความเป็นขั้วให้กับระบบยาง NR โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณ MAH 1.5 phr ซึ่งการมีหมู่ซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ที่แสดงความเป็นขั้วเกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุลของยาง NR อาจเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างอนุภาค pPVC กับยาง NR ส่งผลให้อนุภาค pPVC สามารถกระจายตัวในเฟสยางได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดการเชื่อมโยงแบบขั้ว และการเชื่อมขวางของการผสมยาง ENR ยาง CR และ MAH ลงในยาง NR+pPVC30 ซึ่งลักษณะความเป็นไปได้ของการเชื่อมโยงแบบขั้วและการเชื่อมขวางแสดงดังภาพที่ 57 ถึงภาพที่ 61 นอกจากนี้การที่ยาง ENR และยาง CR มีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง CR (พงษ์ธร, 2547) ทำให้การเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง NR ได้



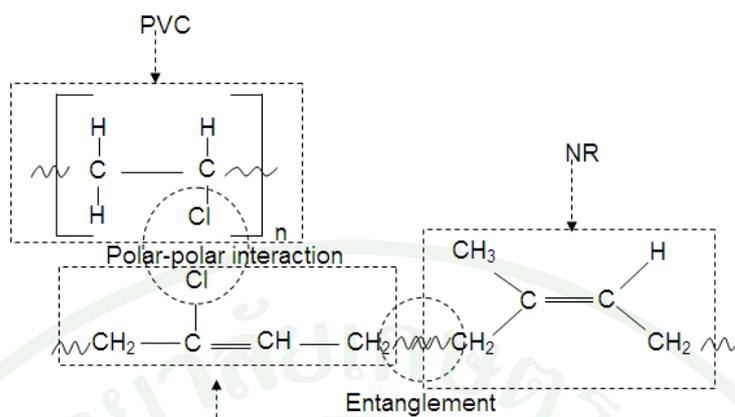
ภาพที่ 55 ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน



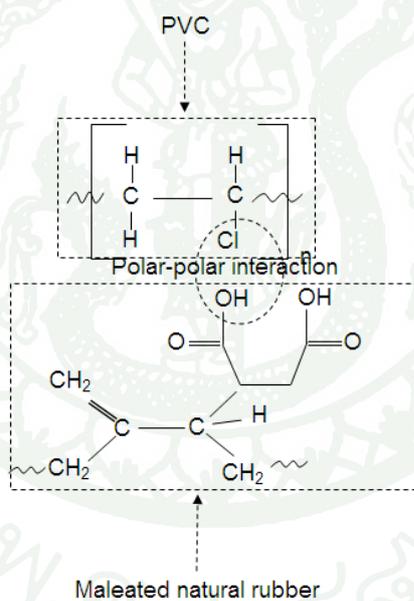
ภาพที่ 56 ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน



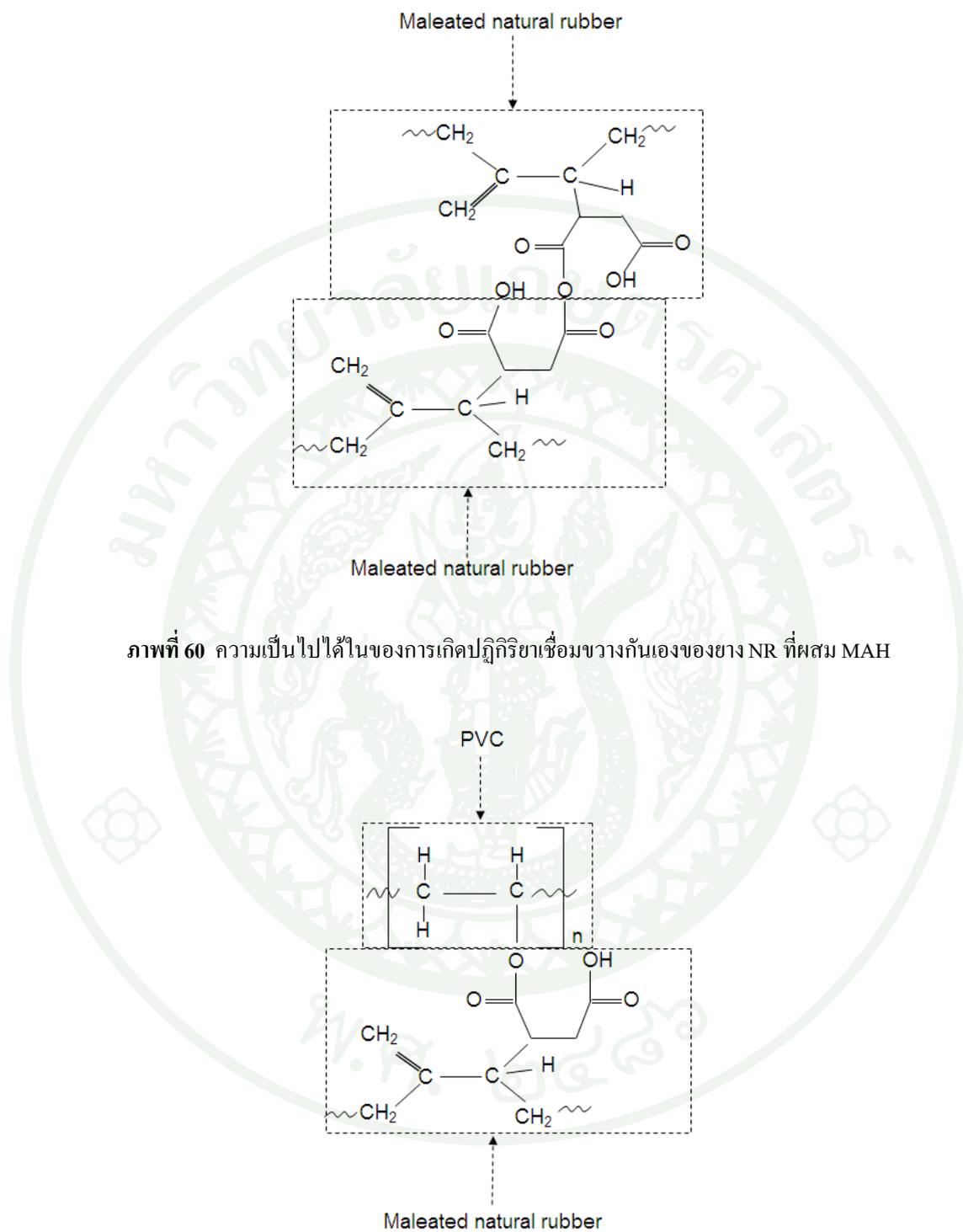
ภาพที่ 57 ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโยงแบบชั่วคราวระหว่างยาง NR สารตัวเติม pPVC และสารช่วยในการยึดเกาะยาง ENR



ภาพที่ 58 ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโยงแบบขั้วระหว่างยาง NR สารตัวเติม pPVC และสารช่วยในการยึดเกาะของ CR



ภาพที่ 59 ความเป็นไปได้ในการเชื่อมโยงแบบขั้วระหว่างยาง NR MAH และสารตัวเติม pPVC

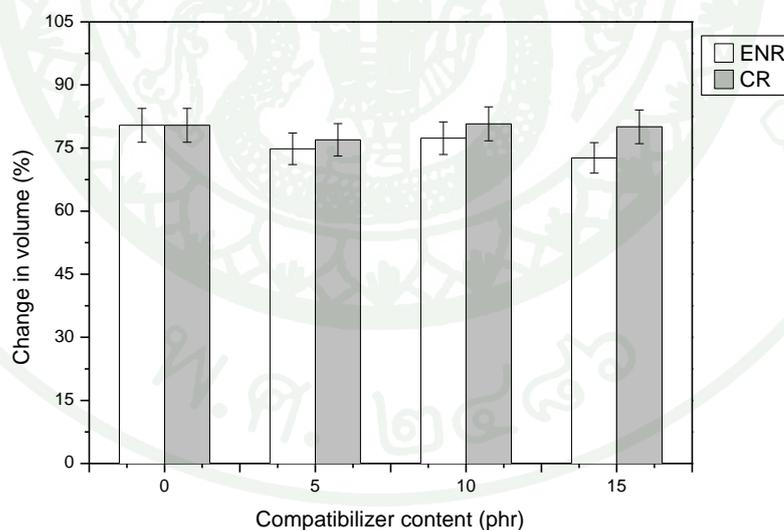


ภาพที่ 60 ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันเองของยาง NR ที่ผสม MAH

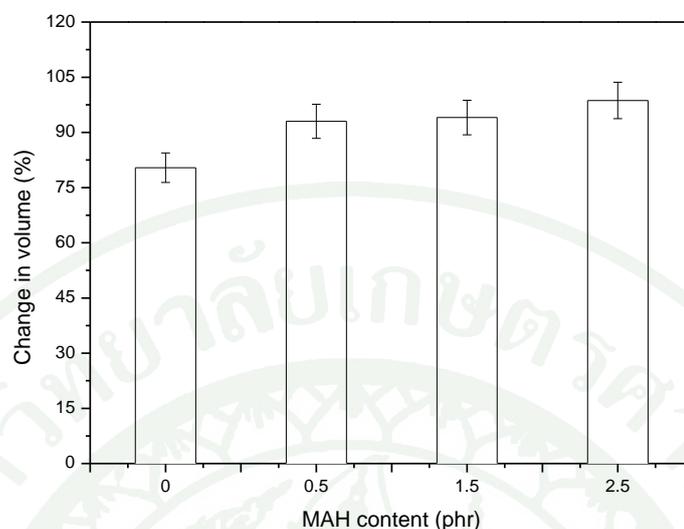
ภาพที่ 61 ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของยาง NR ที่ผสม MAH กับ pPVC

### 5.5 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันของยาง NR

ภาพที่ 62 และ 63 แสดงถึงอิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันของยาง NR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC 30 phr ซึ่งแสดงในรูปของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร ภายหลังการทดสอบโดยการแช่ในน้ำมัน 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันของยาง NR มีแนวโน้มดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความมีขี้ของยาง ENR และการที่ยาง NR เกิดพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟดิกที่ไม่เสถียรต่อความร้อน โดยอาจสามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางใหม่ในรูปของมอนอและไดซัลไฟดิกได้ง่าย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR และ MAH สมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันมีแนวโน้มด้อยลง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ายาง CR และหมู่ซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ที่เกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุลของยาง NR อาจมีความเป็นขี้ แต่ความหนาแน่นโครงสร้างร่างแห อาจมีอิทธิพลที่มากกว่า กล่าวคือ การเกิดพันธะเชื่อมขวางใหม่เกิดขึ้นได้ยากในยาง NR ที่ผสมยาง CR และยาง NR ที่ผสม MAH ทั้งนี้เนื่องจากพันธะคู่ที่ไม่ว่องไวของยาง CR และการที่ MAH ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของกำมะถัน รวมทั้งปริมาณพันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาในยาง NR ลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นโครงสร้างร่างแหลดลง น้ำมันจึงสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยางได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น



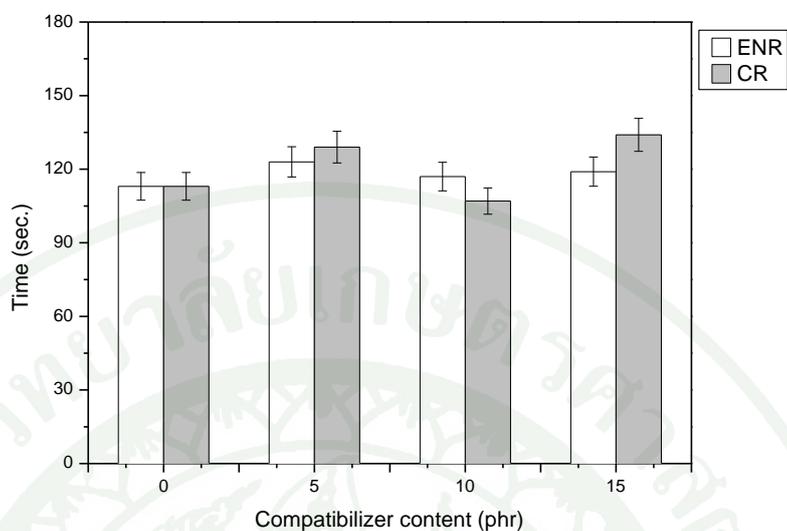
ภาพที่ 62 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรหลังผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน



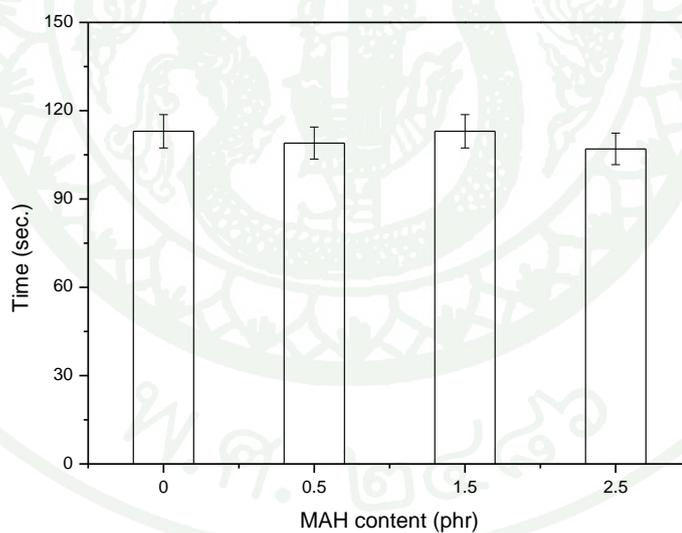
ภาพที่ 63 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรหลังการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน

#### 5.6 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR

อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC 30 phr ดังแสดงในภาพที่ 64 และภาพที่ 65 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR และ MAH ความต้านทานต่อการลามไฟมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR สมบัติความต้านทานต่อการลามไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยาง CR มีอะตอมคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ยางมีสมบัติที่ดีในด้านการทนต่อเปลวไฟ นั่นคือเมื่อยาง CR ติดไฟ สามารถดับไฟได้เองเมื่อนำเปลวไฟออก (อิทธิพล, 2551)



ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน

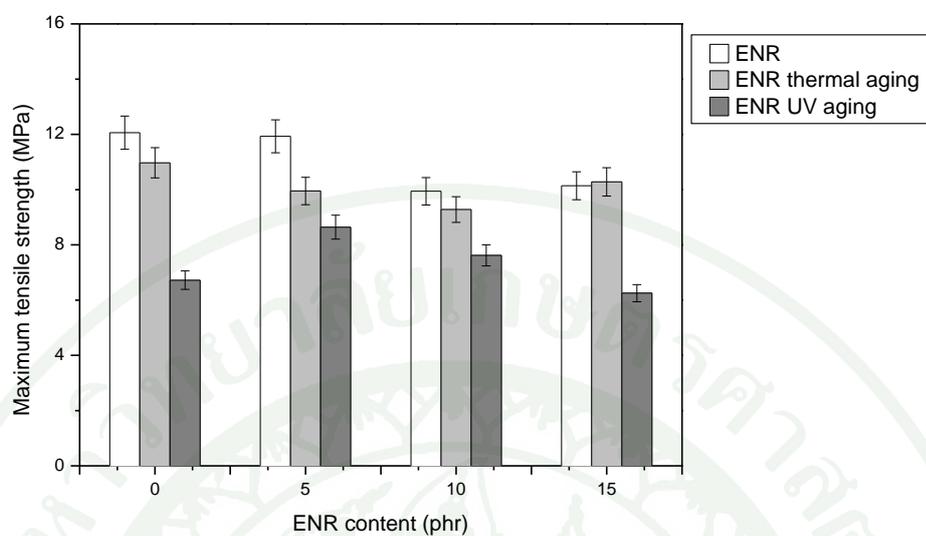


ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน

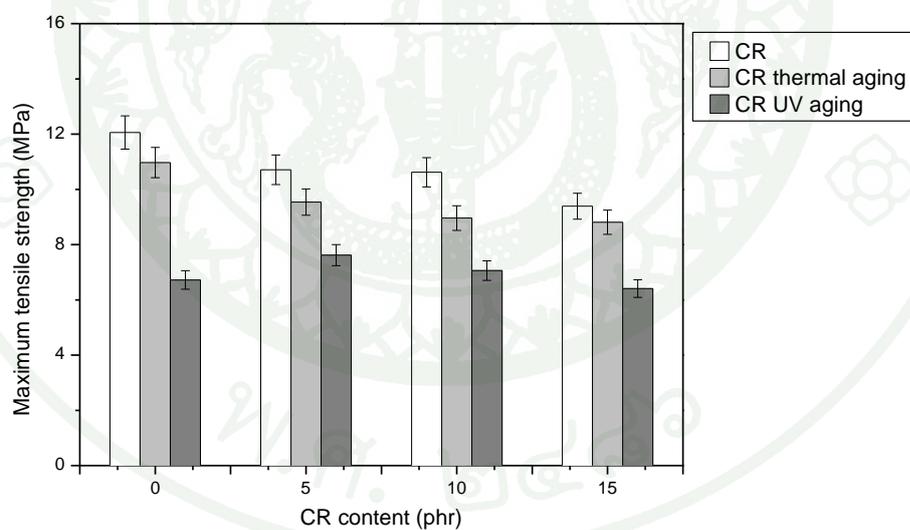
5.7 อิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตของยาง NR

### 1. สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

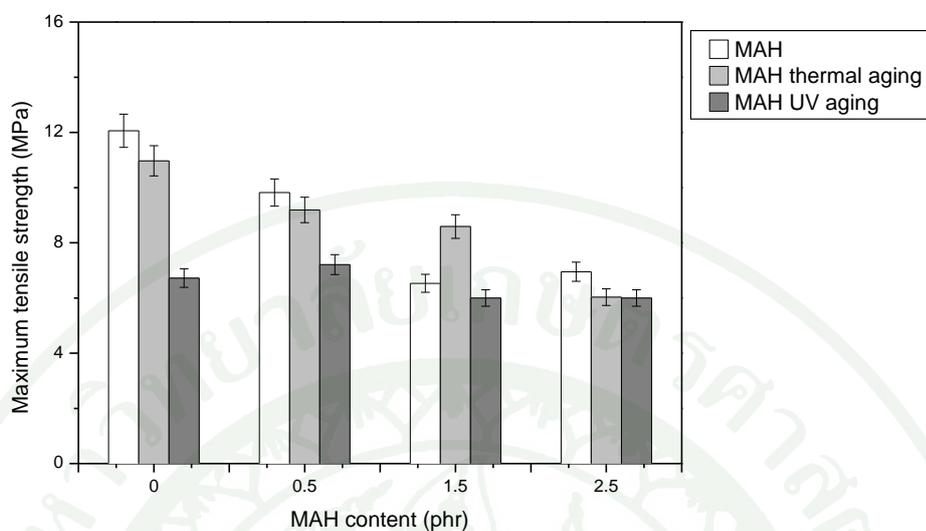
ภาพที่ 66 ถึง 68 แสดงอิทธิพลของยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตของยาง NR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC 30 phr โดยพิจารณาจากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง จากผลการทดสอบพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง ภายหลังจาก การบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต นั่นคือเนื่องจากการเสื่อมสภาพของยาง NR ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง ENR ส่งผลให้อัตราส่วนการลดลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งหมายความว่าปริมาณยาง ENR ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางใหม่ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณยาง CR อาจทำให้สมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพมีแนวโน้มที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม จากการที่ยาง CR ไม่บ่มเร่งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางใหม่ ซึ่งอาจมีอิทธิพลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากการบ่มเร่งที่มากกว่าการเพิ่มปริมาณยาง CR ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.5 นอกจากนี้จากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังจากการบ่มเร่งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน พบว่าการเพิ่มปริมาณ MAH ไม่ส่งผลต่อความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่ MAH 1.5 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแตกตัวของหมู่ซัลฟิไดนิกแอนไฮไดรด์อาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันเอง หรือการเชื่อมขวางกับ pPVC เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 60 และภาพที่ 61 นอกจากนี้ ในกรณีที่ผสม MAH ในปริมาณที่มากเกินไป (ที่ 2.5 phr) ยังส่งผลให้ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยาง NR และยาง ENR อีกทั้งการเสื่อมสภาพของยาง NR ยังมีอิทธิพลที่มากกว่าความต้านทานการเสื่อมสภาพของยาง CR นั่นคือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง NR เช่นเดียวกับในกรณีของยาง NR ที่ผสม MAH



ภาพที่ 66 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต



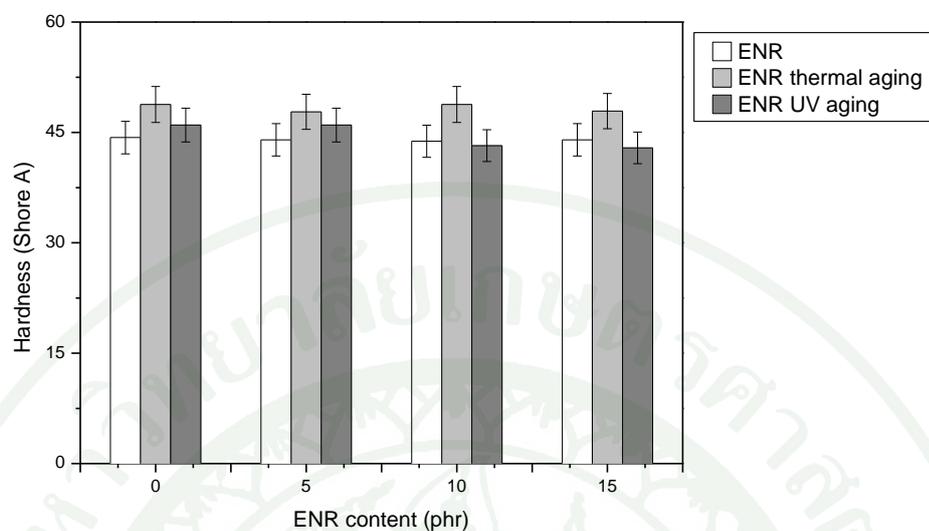
ภาพที่ 67 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต



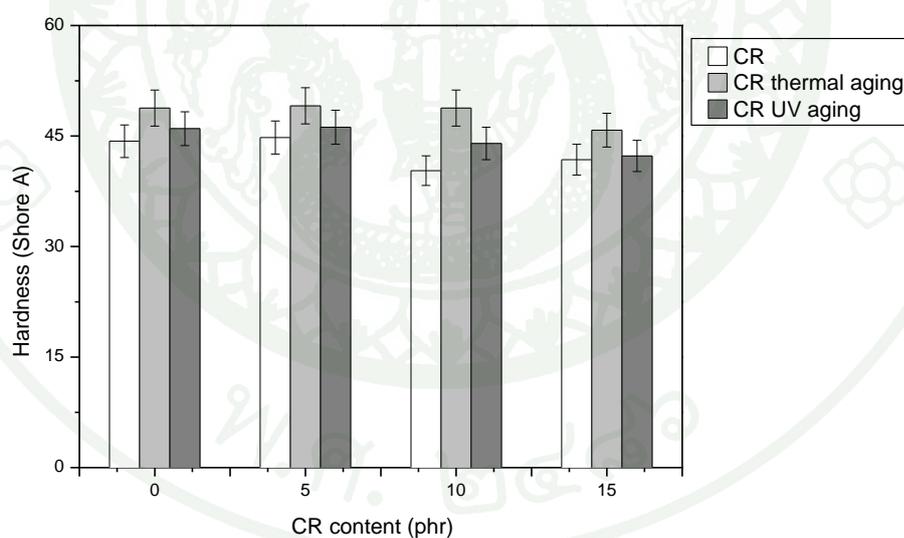
ภาพที่ 68 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

## 2. สมบัติด้านความแข็ง

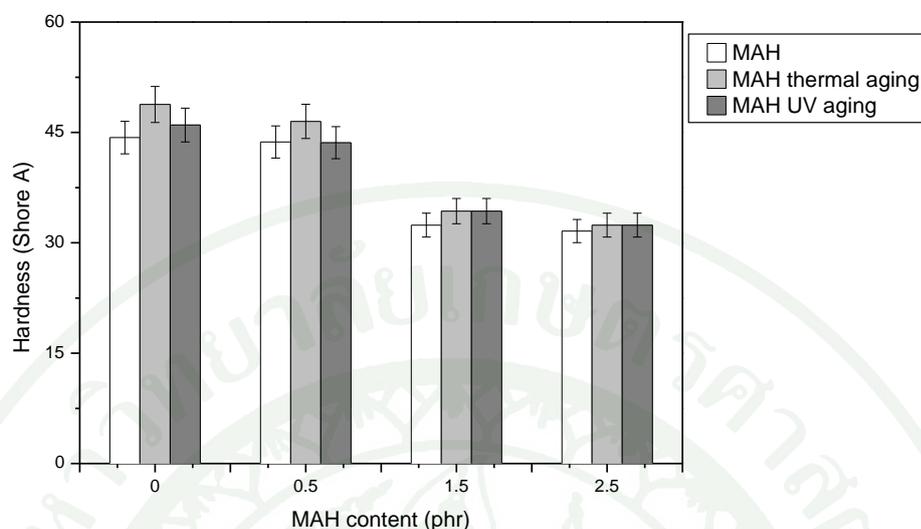
เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของยาง NR ที่ผสมยาง ENR ยาง CR และ MAH ในปริมาณต่างๆ กัน ภายหลังจากบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต ดังแสดงในภาพที่ 69 ภาพที่ 70 และภาพที่ 71ตามลำดับ พบว่าความแข็งเพิ่มขึ้นภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน และความแข็งมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งอาจเนื่องจากการเสื่อมสภาพของยาง NR ส่งผลให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่น และค่าความแข็งที่ไม่เปลี่ยนแปลงอาจเนื่องจากการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง NR และการเกิดพันธะเชื่อมขวางใหม่ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง ENR และยาง CR ค่าความแข็งมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มปริมาณยาง ENR และยาง CR ไม่ส่งผลต่อความแข็งภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต และหากพิจารณาการเพิ่มปริมาณ MAH พบว่าส่งผลต่อความแข็งภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต นั่นคือเมื่อปริมาณ MAH เพิ่มมากขึ้นความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งทางผู้วิจัยคาดว่าควรจะสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และเช่นเดียวกับสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ



ภาพที่ 69 ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต



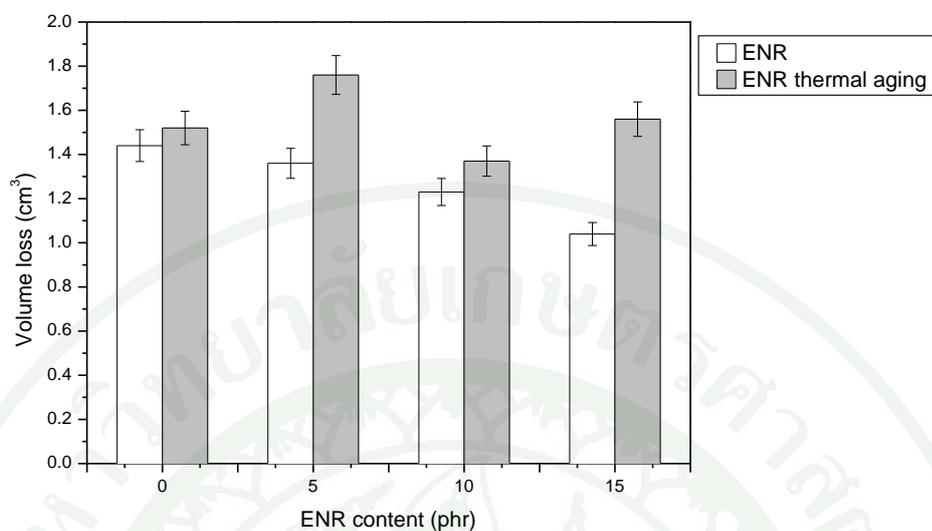
ภาพที่ 70 ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต



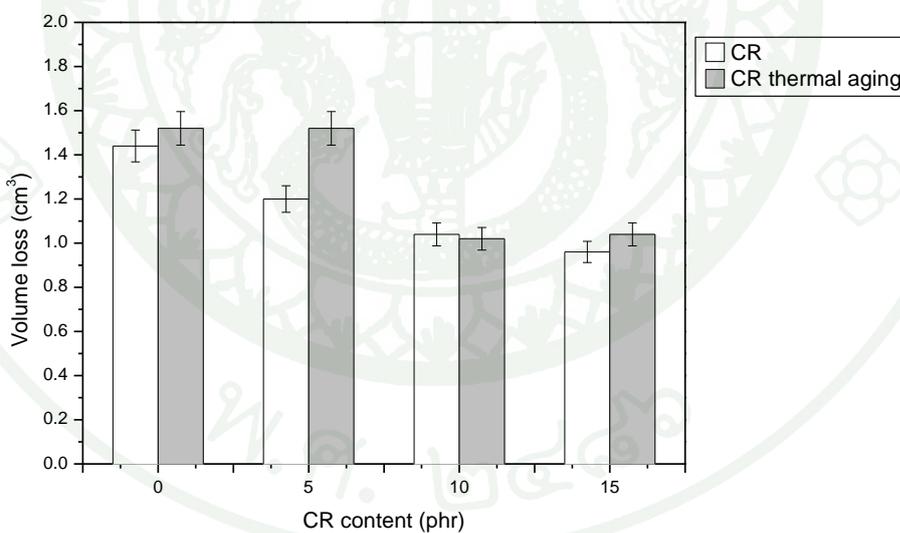
ภาพที่ 71 ค่าความแข็งของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

### 3. สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ

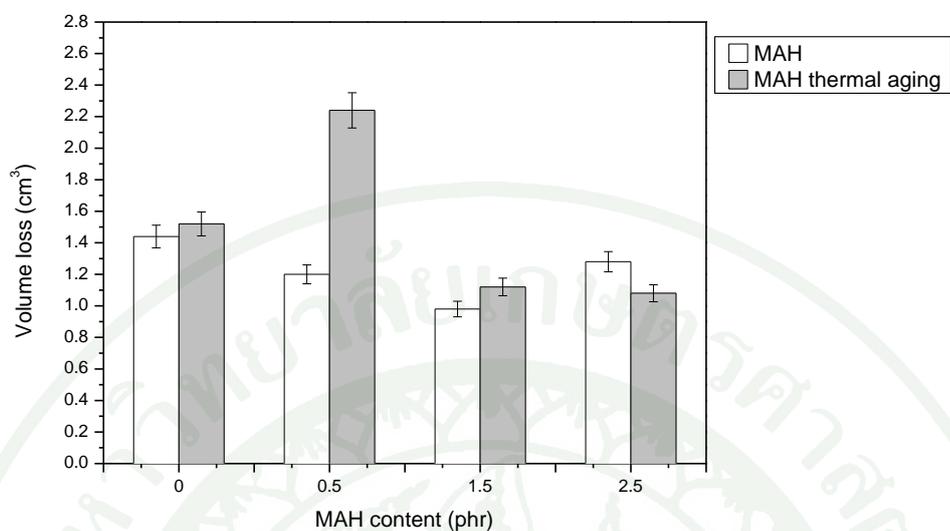
อิทธิพลของปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง NR ที่ปริมาณสารตัวเติม pPVC 30 phr โดยพิจารณาจากสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ดังแสดงในภาพที่ 72 ภาพที่ 73 และภาพที่ 74 ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มมากขึ้น ความต้านทานต่อการสึกหรอมีแนวโน้มลดลง ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยาง NR และยาง ENR รวมทั้งการเชื่อมโยงระหว่างขั้วของคลอรีนอะตอมกับออกซิเจนที่เกิดขึ้น ไม่แข็งแรง ดังนั้นเมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนการเชื่อมโยงดังกล่าวอาจเกิดการสลายตัว ส่งผลให้ความต้านทานต่อการสึกหรอลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR และ MAH อัตราส่วนการสูญเสียปริมาตร ภายหลังจากการขัดสีลดลง นั่นคือการผสมยาง CR และ MAH ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากยาง CR มีความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ดี ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณ MAH เพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องจากหมู่ซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ที่เกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุลยางเกิดการแตกตัว และอาจเกิดการเชื่อมขวางกันเอง หรือการเชื่อมขวางกับ pPVC ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีขึ้น



ภาพที่ 72 ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มแรง และไม่ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน



ภาพที่ 73 ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสมยาง CR ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มแรง และไม่ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน



ภาพที่ 74 ค่าการสูญเสียเชิงปริมาตรของยาง NR+pPVC30 เมื่อผสม MAH ในปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มแรง และไม่ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพลาสติกไฮดรอลิก ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงานผลิตยางขอบกระทกรด มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ และยางไนไตรล์ เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตและต้นทุนในการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงาน รวมถึงความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง NR และยาง NBR ได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี้ ระยะเวลาในการคงรูป สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งแรง สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ สมบัติความต้านทานต่อการขูดตัวเนื่องจากแรงอัด สมบัติความต้านทานการบวมพองในน้ำมัน สมบัติความต้านทานต่อการลามไฟ และสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยาง NR และสารตัวเติม pPVC ซึ่งได้แก่ ยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติในด้านต่างๆ ของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณ 30 phr จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. อิทธิพลของปริมาณ pPVC ต่อสมบัติของยาง NR และยาง NBR

##### 1.1 อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติการไหลและการคงรูปของยาง NR และยาง NBR

การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC ทำให้ค่าความหนืดมูนนี้ของยาง NR และยาง NBR เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากอนุภาค pPVC ที่กระจายตัวในสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น หนืด รวมทั้งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค pPVC กับโมเลกุลของยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NBR พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดของยาง NBR มากกว่ายาง NR และนอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาในการคงรูปของยาง NBR เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ในยาง NR ระยะเวลาในการคงรูปมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำที่ผสมอยู่ใน pPVC อาจทำให้ยางมีสมบัติในการนำความร้อนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NR เนื่องจากพันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา มากกว่าในยาง NBR ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระยะเวลาในการคงรูปในยาง NBR จะขึ้นอยู่กับปริมาณบิวตะไดอินเท่านั้น รวมทั้งการเพิ่มปริมาณ pPVC อาจไปยับยั้งการเข้าทำปฏิกิริยาของกำมะถันในยาง NBR ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปเพิ่มมากขึ้น

##### 1.2 อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง NR และยาง NBR

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ และสมบัติความต้านทานต่อการขูดตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NR มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ pPVC ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC

ในยาง NBR ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก pPVC ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่ายาง NR แต่สูงกว่ายาง NBR และการที่ pPVC และยาง NBR มีสมบัติความเป็นขั้ว ในขณะที่ยาง NR ไม่มีสมบัติความเป็นขั้ว ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการเข้ากันได้ หรือความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่าง pPVC กับยาง รวมถึงการที่ pPVC เป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีสมบัติความเป็นวัสดุที่มากกว่าสมบัติความเป็นอีลาสติค ส่งผลให้ความยืดหยุ่นในยาง NR มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การที่ความแข็งของยาง NR และยาง NBR มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่ pPVC มีแนวโน้มค่าผสมอยู่ส่งผลต่อความแข็งของยางโดยตรง

### 1.3 อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของยาง NR และยาง NBR

เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC ในยาง NR และยาง NBR ส่งผลให้แนวโน้มการบวมพองในน้ำมันลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ความเป็นขั้วของ pPVC ซึ่งสามารถต้านทานการบวมพองในน้ำมันได้ดี และการที่ pPVC เกิดการสลายตัว ก่อให้เกิดก๊าซ HCl หรือ  $Cl_2$  ปกคลุมผิวหน้าของชิ้นงานป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับเปลวไฟ ทำให้สามารถต้านทานการลามไฟได้ ส่งผลให้ยาง NR มีสมบัติความต้านทานการลามไฟที่ดีขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NBR ความต้านทานการลามไฟมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณเถ้าที่เกิดจากยาง NBR ปกคลุมผิวหน้าชิ้นงานลดลงเมื่อปริมาณ pPVC เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเกิดการเชื่อมโยงแบบขั้วขัดขวางการสลายตัวของ pPVC ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานต่อการลามไฟดีด้อยลง

### 1.4 อิทธิพลของปริมาณ pPVC ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพของยาง NR และยาง NBR

การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม pPVC มีแนวโน้มทำให้สมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลตดีขึ้น โดยพิจารณาจากสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง NR และยาง NBR ก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NR ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ pPVC เกิดปรากฏการณ์เจลเลชั่น ก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ของ pPVC รวมทั้งการที่สารพลาสติกไซเซอร์เกิดการสลายตัว ในขณะที่ความแข็งมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ภายหลังจากบ่มเร่งความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต

## 2. อิทธิพลของสารช่วยในการยึดเกาะ และสารเชื่อมประสานต่อสมบัติของยาง NR

2.1 อิทธิพลของปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติการไหลและการคงรูปของยาง NR+pPVC30

ค่าความหนืดมูนีของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ในปริมาณ 30 phr มีแนวโน้มลดลง เมื่อผสมยาง ENR และยาง CR ทั้งนี้เนื่องจากยาง NR มีความหนืดมูนีที่สูงกว่ายาง CR อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ายาง NR มีความหนืดมูนีต่ำกว่ายาง ENR แต่การลดลงของค่าความหนืดมูนีเมื่อผสมยาง ENR แสดงให้เห็นว่าแรงเฉือนในขณะบดผสมมีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของยาง ENR มากกว่ายาง NR จึงส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีในระบบมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ MAH ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีของยาง NR มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งการผสม MAH ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอาจทำให้ MAH ทำหน้าที่เสมือนเป็นพลาสติกไซเซอร์

ระยะเวลาในการคงรูปที่ 90 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR เนื่องจากยาง ENR มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้พันธะคู่ของไอโซพรีนว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR และ MAH ทำให้ระยะเวลาในการคงรูปมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ยาง CR มีคลอรีนอะตอม ทำให้พันธะคู่ที่อยู่ใกล้ไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และการผสม MAH ส่งผลให้พันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของยาง NR ลดลง รวมทั้ง MAH เข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยาง ขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของกำมะถัน ส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปเพิ่มสูงขึ้น

2.2 อิทธิพลของปริมาณ ยาง ENR ยาง CR และ MAH มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง NR+pPVC30

การเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก ยาง ENR มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และการมีหมู่ซัลฟอนิกแอนไอออนิกของการผสม MAH อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ทำให้ยางไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืดดึง ในขณะที่ในยาง CR สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืดดึง แต่ความต้านทานต่อแรงดึงของยาง CR ก็ยังคงมีค่าน้อยกว่ายาง NR และการที่ยาง CR มีความยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับการผสม MAH ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ MAH เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง ENR ความแข็งแรงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยาง ENR ยาง CR และ MAH ช่วยเพิ่มความเป็นขี้ผึ้งในระบบ และเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค pPVC ในเฟสยาง รวมทั้งอาจเกิดการเชื่อมโยงแบบขี้ผึ้ง หรือการเชื่อมขวางด้วยตัวเอง

#### 2.4 อิทธิพลของปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของยาง NR+pPVC30

ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องจากความมีขี้ขี้และความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพันธะคู่ของยาง ENR อาจเกิดพันธะเชื่อมขวางใหม่ได้ง่าย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR และ MAH สมบัติความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ายาง CR และหมู่ซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ที่เกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุลของยาง NR อาจมีความเป็นขี้ขี้ แต่ความหนาแน่น โครงสร้างร่างแหยังอาจมีอิทธิพลที่เหนือกว่า กล่าวคือ การเกิดพันธะเชื่อมขวางใหม่เกิดขึ้นได้ยากในยาง NR ที่ผสมยาง CR และยาง NR ที่ผสม MAH ส่งผลให้ความหนาแน่น โครงสร้างร่างแหลดลง น้ำมันจึงสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยางได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การที่ยาง CR มีอะตอมคลอรีนอยู่ในสายโซ่โมเลกุล จึงส่งผลต่อสมบัติความต้านทานการลามไฟที่ดีขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง ENR และ MAH สมบัติการต้านทานการลามไฟมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

#### 2.5 อิทธิพลของปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการเสื่อมสภาพของยาง NR+pPVC30

การผสมยาง ENR ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง CR และ MAH สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นในกรณีที่ผสม MAH ในปริมาณ 1.5 phr หากพิจารณาผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของยาง NR ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่าการเพิ่มปริมาณยาง ENR ยาง CR และ MAH ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง NR มีแนวโน้มดีขึ้น เมื่อผสม MAH และยาง CR ทั้งนี้เนื่องจากยาง CR มีความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดี รวมทั้งความแข็งแรงของการเชื่อมโยงพันธะ และหมู่ซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่บนสายโซ่โมเลกุลของยาง NR อาจเกิดการแตกตัวเกิดการเชื่อมขวางกันเองหรือการเชื่อมขวางกับ pPVC

## ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าผสมสารตัวเติม pPVC ได้ปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง NR และ NBR แต่ยังคงมีสมบัติต่างๆ ที่ยังคงอยู่ ดังแสดงในตารางที่ 16 ซึ่งคิดว่าควรทำการศึกษาการผสมสารตัวเติมที่ใช้กันโดยทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น เชม่าคำ หรือ ซิลิกา เป็นต้น ลงในสารตัวเติม pPVC เพื่อเพิ่มสมบัติของยาง NR และยาง NBR ให้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 16 สมบัติต่างๆ ของการเพิ่มปริมาณ pPVC ในยาง NR และยาง NBR

สมบัติของยาง	NR	NBR
ความต้านทานต่อแรงดึง	ลดลง	เพิ่มขึ้น
ความแข็ง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
ความต้านทานต่อการสึกหรอ	ลดลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ความต้านทานต่อการอัดตัว	ลดลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
ความต้านทานต่อการลามไฟ	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ		
- ความต้านทานต่อแรงดึง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
- ความแข็ง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
- ความต้านทานต่อการสึกหรอ	เพิ่มขึ้น	ไม่เปลี่ยนแปลง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จตุพร ใจบุญ และอรสา ภัทรไพฑูรย์ชัย. 2549. การตัดแปรงกากปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. แหล่งที่มา: [http://www.scisoc.or.th/stt/32/sec\\_e/paper/stt32\\_E\\_E0034.pdf](http://www.scisoc.or.th/stt/32/sec_e/paper/stt32_E_E0034.pdf), 20 เมษายน 2550.
- จริญญา เขาว์แสง. 2546. ความต้านทานน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จักรวธ ตันท์สุระ, วัฒนศักดิ์ เสวกสกวพันธ์, สุทธิพันธุ์ ภาสุปรีย์ และฉันททิพ คำนวนทิพย์. 2549. พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีนเพื่อใช้ในการผลิตปะเก็น. แหล่งที่มา: [http://www.irpus.org/project\\_file](http://www.irpus.org/project_file), 25 ธันวาคม 2549.
- เจริญ นาคะสรรค์, จิราภรณ์ เขียนชดคำ และอาชีชน แกสมาน. 2548. รายงานโครงการกาวติดยางกับโลหะจากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับมาลิกแอนไฮไดรด์. โครงการวิจัยแห่งชาติขางพารา, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- ชัชวาลย์ กันทะลา, เอกชัย วิมลมาลา, ชาคริต สิริสิงห์ และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2550. อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์. แหล่งที่มา: <http://www.202.44.9.82/Journals/SEEM2007/paper2007/NC>, 4 ตุลาคม 2550.
- ชิตีไชยิยะห์ สายวาริ, วันเฉลิม แวดอเลาะ และเจริญ นาคะสรรค์, 2550. รายงานโครงการการเตรียมและสมบัติของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติมาลิกแอนไฮไดรด์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน. โครงการวิจัยแห่งชาติขางพารา, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- ประณัฐ โพธิยะราช, ประกายเพชร พันธุ์ชัยเพชร และเสาวรจณ์ ชั่วจุลจิตร์. 2550. การใช้เส้นใยผักตบชวาเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. แหล่งที่มา: <http://www.research.sc.chula.ac.th>, 9 ธันวาคม 2550.
- พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย. 2547. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), กรุงเทพฯ.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, กรุงเทพฯ.

พิศาล อภัยสม. 2549. การศึกษาการเกิดผลึกในยางธรรมชาติโดยการดึง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ยุทธชาติ วิเชียรบุตร, เจริญยุทธ เดชวาชกุล และวิริยะ ทองเรือง. 2547. สมบัติของยางธรรมชาติเติมด้วยถั่วลันเตา  
 ลิกไนต์ – การบ่มและสมบัติเชิงกล. แหล่งที่มา:  
[http://www.engineer.msu.ac.th/CD\\_Conference/conference/Me\\_net18/fullpaper/amm/AMM21.pdf](http://www.engineer.msu.ac.th/CD_Conference/conference/Me_net18/fullpaper/amm/AMM21.pdf), 18  
 ตุลาคม 2547.

รัชนี ฉินกมลทอง. 2551. การศึกษาสมบัติการไหลและความเป็นไปได้ในการนำยางขบกระจกที่ผลิตจากวัสดุ  
 พลาสติกชนิดพีวีซีมาผลิตซ้ำ. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรารักษ์ ขจรไชยกุล. 2541. เทคโนโลยียาง. สถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์,  
 กรุงเทพฯ.

วิภา เสวกนิษฐ์. 2544. สารเคมีสำหรับยาง. ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. กระทรวง  
 เกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ศิรินทร ทองแสง และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2551. การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยถั่วลันเตาจากแหล่งต่างๆ  
 ภายในประเทศ. แหล่งที่มา:  
<http://www.sutlib1.sut.ac.th/Sutjournal>, 21 มกราคม 2551.

อิทธิพล แจ่มชัด. 2551. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,  
 กรุงเทพฯ.

Choi, S-S. 2002. Improvement of properties of silica-filled natural rubber using polychloroprene compound.  
**Journal of Applied Polymer Science**. 83: 2609-2616.

Ciullo, Peter A. 1996. **Industrial minerals and their uses: a handbook and formulary**. William Andrew.  
 United States of America.

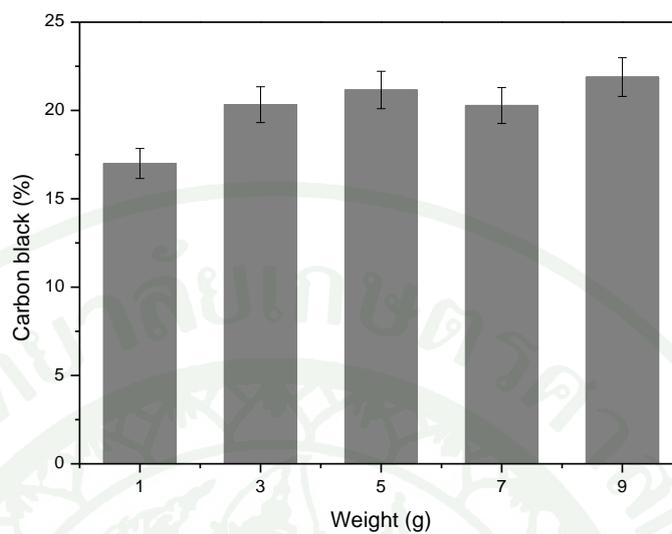
- Das, A., SC. Debnath, D. De and OK. Basu. 2004. Evaluation of physical properties and curing characteristics of silica-filled Ethylene-Propylene –Diene terpolymer in the presence of Chloroprene Rubber. **Journal of Applied Polymer Science**. 93: 196-200.
- George, K.M., J.K Varkey and N.M. Mathew. 2002. Epoxidized natural rubber as a reinforcement modifier for silica-filled nitrile rubber. **Journal of Applied Polymer Science**. 85: 292-306.
- George, S., R. Joseph and S. Thomas. 1995. Blends of isotactic polypropylene and nitrile rubber : morphology, mechanical properties and compatibilization. **Polymer**. 36: 4405-4416.
- Ismail, H. and A.M.M. Yusof. 2004. Blend of waste poly (vinylchloride) (PVCw) /acrylonitrile butadiene rubber (NBR): the effect of maleic anhydride (MAH). **Polymer Testing**. 23: 675-683.
- Pichaiyut, S., C. Nakason, A. Kaesaman and S. Kiatkamjornwong. 2008. Influences of blend compatibilizers on dynamic,mechanical,and morphological properties of dynamically cured maleated natural rubber and high-density polyethylene blends. **Polymer Testing**. 27: 566-580.
- Sedequl, A.M., U.S. Ishiaku and B.T. Poh. 1999. Cure index and activation energy of ENR 25 compared with SMR L in various vulcanization system. **European Polymer Journal**. 35: 711-719.
- Teh, P.L., Z.A. Mohd Ishak and A.S. Hashim. 2004. Effect of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites. **European Polymer Journal**. 40: 2513-2521.
- Toki, S., I. Sics, S. Ran, L. Liu and B. S. Hsiao. 2003. Molecular orientation and structural development in vulcanized polyisoprene rubbers during uniaxial deformation by in situ synchrotron X-ray diffraction. **Polymer**. 44: 6003–6011.
- Wang, Q., Z. Zhang, S. Liu, H. Gui, J. Lai, Y. Liu, J. Gao, F. Huang, Z. Song, B. Tan and J. Qiao. 2005. Ultrafine full-vulcanized powdered rubbers/PVC compounds with higher toughness and higher heat resistance. **Polymer**. 46: 10614-10617.
- Hofmann, W. 1989. **Rubber technology handbook**. Hanser Publishers. Munich Vienna. New York.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมมาดำใน pPVC



ภาพผนวกที่ ก1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเขม่าดำใน pPVC



ภาคผนวก ข  
ผลการทดสอบสมรรถภาพการทรงรูป

**ตารางผนวกที่ ข1** ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Max torque	Min torque	Max-min torque	TS1(min)	TS2(min)	TC50(min)	TC90(min)
0	57.7	7.3	50.4	2.58	3.11	3.17	5.01
30	50.1	7.7	42.4	3.1	3.27	3.29	4.48
50	47.6	7.8	39.8	2.55	3.15	3.19	4.44

**ตารางผนวกที่ ข2** ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Max torque	Min torque	Max-min torque	TS1(min)	TS2(min)	TC50(min)	TC90(min)
0	70.9	6.02	64.88	3.5	3.75	5.75	7.58
30	51.73	6.24	45.49	3.58	4	6.42	9.75
50	47.49	6.39	41.1	3.92	4.42	7	10.67

**ตารางผนวกที่ ข3** ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน

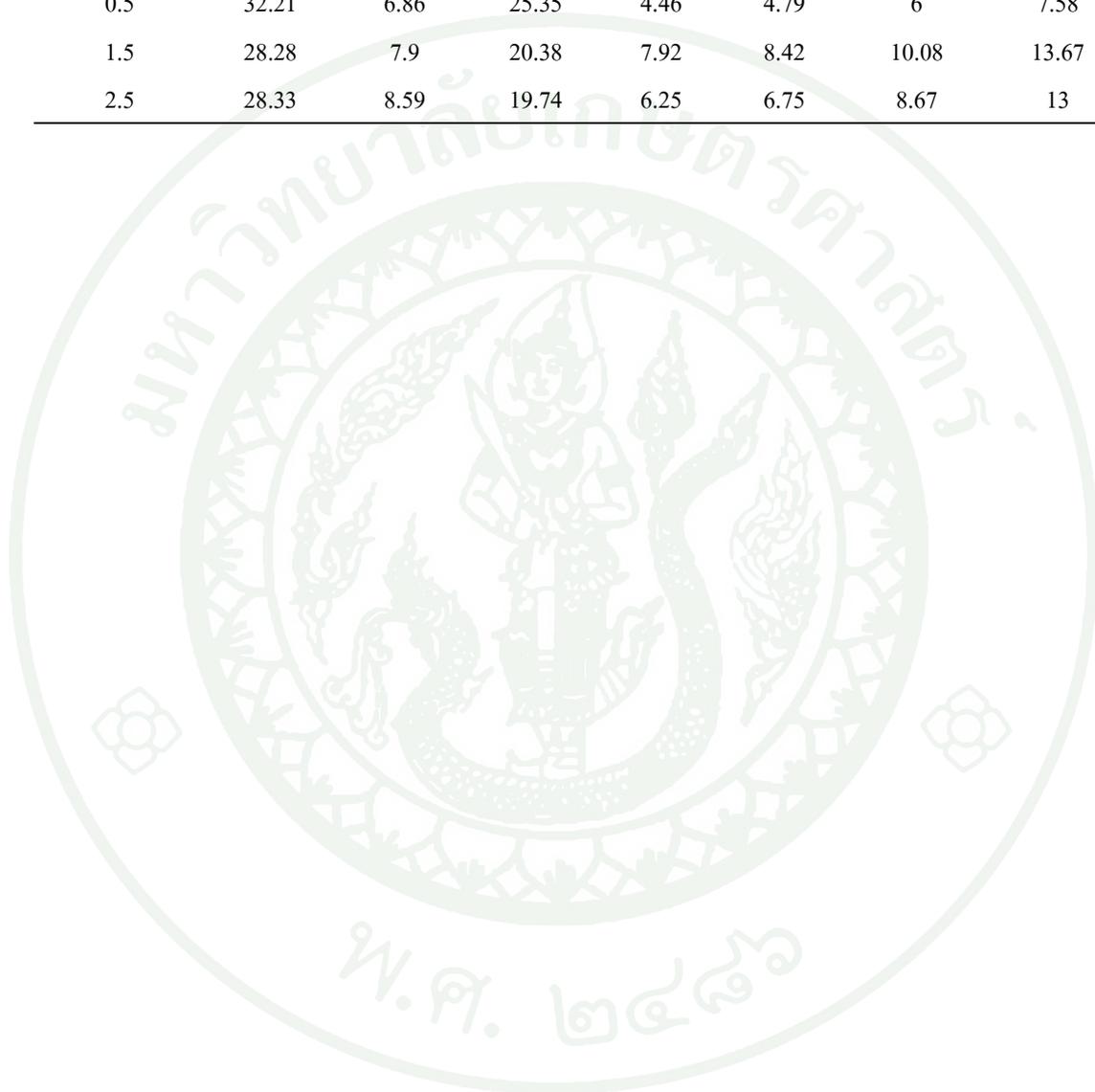
ENR content (phr)	Max torque	Min torque	Max-min torque	TS1(min)	TS2(min)	TC50(min)	TC90 (min)
5	49	7.4	41.6	3.12	3.28	3.3	4.5
10	48	5.5	42.5	2.36	2.51	2.53	4.18
15	48.3	7.2	41.1	2.36	2.51	2.52	3.52

**ตารางผนวกที่ ข4** ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน

CR content (phr)	Max torque	Min torque	Max-min torque	TS1(min)	TS2(min)	TC50(min)	TC90 (min)
0	48.6	7	41.6	3.14	3.32	3.33	4.53
30	46	4.5	41.5	3.54	4.18	4.19	5.53
50	45.1	5.4	39.7	4.45	5.15	6.21	7.22

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบระยะเวลาในการคงรูปของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน

MAH conten (phr)	Max torque	Min torque	Max-min torque	TS1(min)	TS2(min)	TC50(min)	TC90(min)
0.5	32.21	6.86	25.35	4.46	4.79	6	7.58
1.5	28.28	7.9	20.38	7.92	8.42	10.08	13.67
2.5	28.33	8.59	19.74	6.25	6.75	8.67	13





ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ปริมาณ  
ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0	1	211.15	16.29	2.19	577.68	25.47
	2	268.04	21.07	1.72	723.4	22.34
	3	167.99	13.21	1.82	628.03	24.97
	mean	215.73	16.86	1.91	643.03	24.26
30	1	153.13	12.39	1.57	687.57	23.86
	2	139.74	11.76	1.43	729.76	23.65
	3	156.76	12.04	1.5	686.2	23.45
	mean	149.88	12.06	1.5	701.18	23.65
50	1	96.91	8.92	1.51	649.74	26.2
	2	83.68	7.71	1.29	727.33	24.26
	3	95.81	8.32	1.35	692.45	25.76
	mean	92.13	8.32	1.39	689.84	25.4

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ปริมาณ  
ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

pPVC Content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0	1	212.1	18.41	1.97	664.02	23.31
	2	163.02	12.94	2.33	662.86	24.37
	mean	187.56	15.67	2.15	663.44	23.84
30	1	116.78	9.73	1.87	577.13	25.63
	2	13.39	12.27	1.86	626.3	22.11
	3	128.82	10.9	1.84	609.44	25.36
	mean	128	10.97	1.86	604.29	24.37
50	1	104.12	8.19	1.42	662.54	24.39
	2	92.76	7.16	1.29	679.46	22.97
	mean	98.44	7.67	1.35	671	23.68

ตารางผนวกที่ ๓ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR ที่ผสมสารตัวเติม pPVC ปริมาณต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

pPVC content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0	1	141.49	12.22	2.07	603.74	25.6
	2	115.05	9.59	2.32	522.47	24.98
	3	110.79	9.1	2.34	502.12	24.92
	mean	122.44	10.03	2.24	542.77	25.17
30	1	87.26	7.03	2.19	480.98	24.66
	2	86.43	6.76	1.89	529.94	25.66
	3	82.73	6.38	2.09	484.21	24.6
	mean	85.47	6.72	2.06	498.38	24.97
50	1	73.24	5.7	1.53	570.42	25.19
	2	63.24	5.24	1.65	523.27	25.98
	3	80.01	6.26	1.64	566.29	25.95
	mean	72.16	5.74	1.61	553.33	25.71

ตารางผนวกที่ ค4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0	1	27.27	2.55	1.88	407.88	25.65
	2	23.94	2.25	1.77	415.68	26.71
	3	29.07	2.62	1.98	394.36	24.89
	mean	26.76	2.47	1.88	405.97	25.75
30	1	35.43	3.43	0	155.03	25.2
	2	35.23	3.37	3.26	307.82	24.3
	3	33.31	3.43	3.21	315.11	23.95
	mean	34.66	3.41	3.23	259.32	24.48
50	1	49.25	4.41	3.22	386.45	22.91
	2	54.27	4.37	3.73	343.04	25.74
	3	51.04	4.36	3.86	331.35	24.66
	mean	51.52	4.38	3.60	353.61	24.44

ตารางผนวกที่ ๕ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน  
เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

pPVC content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0	1	22.04	2.28	2.07	340.04	25.71
	2	23.31	2.37	1.97	371.41	25.72
	3	25.21	2.41	2.13	346.91	26.3
	mean	23.52	2.35	2.06	352.79	25.91
30	1	47.86	3.69	3.3	329.52	25.81
	2	41.75	3.44	3.13	323.48	22.73
	3	38.14	3.36	0	155.85	23.48
	mean	42.58	3.50	2.14	269.62	24.01
30	1	49.57	4.54	4.17	321.36	27.36
	2	47.42	4.39	0	298.37	24.49
	3	48.26	4.49	4.41	305.62	24.48
	mean	48.42	4.47	2.86	308.45	25.44

ตารางผนวกที่ ๑๖ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน  
เมื่อผ่านการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

pPVC content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	100% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0	1	20.23	1.71	1.27	223.53	25.28
	2	20.22	1.81	1.27	251.55	24.84
	3	22.17	1.75	1.24	254.16	24.06
	mean	20.87	1.76	1.26	243.08	24.73
30	1	31.52	3.04	1.5	290.34	24.39
	2	36.46	3.23	1.47	300.27	25.17
	3	34.78	3.17	1.53	269.38	24.87
	mean	34.25	3.15	1.50	286.66	24.81
50	1	49.36	3.81	1.7	291.2	24.98
	2	48.17	3.82	1.75	274.61	25.05
	3	52.08	3.95	1.72	297	24.25
	mean	49.87	3.86	1.72	287.60	24.76

ตารางผนวกที่ ๗ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน

ENR content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
5	1	156.50	12.91	2.13	651.01	26.60
	2	125.12	10.31	2.13	626.6	27.70
	3	162.12	12.57	2.08	643.70	27.62
	mean	147.91	11.93	2.11	640.44	27.30
10	1	116.55	10.33	2.09	622.95	24.42
	2	107.44	9.14	1.93	647.38	25.86
	3	116.13	10.35	2.09	623.68	24.20
	mean	113.38	9.94	2.04	631.34	24.83
15	1	108.63	9.33	1.94	649.89	25.32
	2	118.35	9.35	1.96	654.75	24.30
	3	137.46	11.75	1.95	711.15	22.62
	mean	121.48	10.14	1.95	671.93	24.08

ตารางผนวกที่ ๘ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ENR content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
5	1	116.06	9.87	2.55	570.67	24.43
	2	105.73	9.47	2.61	535.22	25.38
	3	122.84	10.50	2.54	578.58	26.34
	mean	114.88	9.95	2.57	561.49	25.36
10	1	109.50	9.41	2.20	617.49	24.62
	2	119.17	10.19	2.55	576.39	25.70
	3	96.87	8.24	2.23	591.16	24.71
	mean	108.51	9.28	2.32	595.01	25.01
15	1	114.31	10.08	2.60	556.95	26.76
	2	117.79	10.22	2.37	610.01	26.22
	3	125.79	10.54	2.58	567.35	28.53
	mean	119.93	10.28	2.52	578.10	27.17

ตารางผนวกที่ ๙ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มแรงรังสีอัลตราไวโอเลต

ENR content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
5	1	96.82	8.28	2.37	557.78	24.71
	2	101.04	8.64	2.49	544.66	26.04
	3	103.93	9.02	2.49	545.15	23.76
	mean	100.6	8.64	2.45	549.2	24.84
10	1	87.52	7.05	2.36	536.13	26.44
	2	86.69	7.33	2.32	554.86	25.81
	3	101.65	8.47	2.34	597.29	26.93
	mean	91.95	7.62	2.34	562.76	26.39
15	1	93.41	7.67	2.46	533.62	25.94
	2	56.69	4.63	2.30	467.81	26.71
	3	78.28	6.46	2.41	521.23	24.91
	mean	77.12	6.25	2.39	507.55	25.85

ตารางผนวกที่ ค10 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน

CR content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
5	1	122.40	10.52	1.55	676.47	24.67
	2	127.91	10.15	1.61	657.98	25.04
	3	140.20	11.54	1.58	678.29	25.21
	mean	130.17	10.71	1.58	670.91	24.97
10	1	113.18	9.93	1.53	673.73	26.09
	2	113.28	10.32	1.54	672.94	25.10
	3	129.51	11.60	1.50	719.23	24.26
	mean	118.66	10.62	1.52	688.63	25.15
15	1	101.48	9.14	1.50	722.43	24.62
	2	111.63	10.22	1.56	795.46	21.79
	3	93.91	8.79	1.40	733.52	23.18
	mean	102.34	9.39	1.49	750.47	23.20

ตารางผนวกที่ ค11 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

CR content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
5	1	121.39	9.63	1.92	598.71	25.44
	2	124.88	9.33	1.92	569.28	25.03
	3	125.23	9.66	2.04	565.43	25.23
	mean	123.83	9.54	1.96	577.81	25.23
10	1	103.14	8.68	1.81	5744.46	25.32
	2	113.05	9.06	1.76	605.64	25.18
	3	111.27	9.14	1.71	612.76	25.62
	mean	109.15	8.96	1.76	597.62	25.38
15	1	99.09	8.74	1.71	622.16	25.26
	2	103.86	9.02	1.73	635.49	25.84
	3	102.63	8.68	1.69	625.49	25.35
	mean	101.86	8.81	1.71	627.71	25.48

ตารางผนวกที่ ค12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

CR content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
5	1	89.98	8.57	1.97	567.6	25.61
	2	80.76	7.65	2.02	539.49	26.34
	3	77.23	6.63	1.9	534.77	27.46
	mean	82.65	7.62	1.96	547.29	26.47
10	1	77.25	6.89	1.78	560.93	25.68
	2	78.6	7.24	1.76	570.89	25.82
	mean	77.93	7.06	1.77	565.91	25.75
15	1	76.51	6.38	1.82	564.9	25.15
	2	78.18	6.3	1.61	598.35	25.6
	3	79.58	6.57	1.84	564.73	24.37
	mean	78.09	6.41	1.72	575.99	25.04

ตารางผนวกที่ ค13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH  
ต่างๆ กัน

MAH content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0.5	1	106.71	9.94	1.3	713.51	27.99
	2	108.42	9.82	1.31	697.06	26.72
	3	104.15	9.7	1.26	711.7	29.45
	mean	106.43	9.82	1.29	707.42	28.05
1.5	1	91.93	7.09	1.06	692.79	24.6
	2	88.91	7.06	1.01	707.59	28.09
	3	69.05	5.43	0.97	716.22	26.37
	mean	83.3	6.53	1.01	705.53	26.35
2.5	1	76.15	7.34	1.1	667.12	24.02
	2	65.67	6.33	0.99	715.3	24.41
	3	71.37	7.17	0.99	748.05	24.66
	mean	71.06	6.94	1.03	710.16	24.37

ตารางผนวกที่ 14 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

MAH content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0.5	1	103.02	9.65	1.79	590.82	24.9
	2	94.13	8.76	1.62	629.55	25.66
	3	93.55	9.17	1.8	577.66	26.04
	mean	96.90	9.19	1.74	599.34	25.53
1.5	1	97.73	7.68	1.87	535.27	25.94
	2	127.7	10.75	1.43	681.76	25.73
	3	86.77	7.34	1.58	593.12	27.18
	mean	104.07	8.59	1.63	603.38	26.28
2.5	1	78.07	7.27	1.19	692.42	24.25
	2	61.56	5.73	1.25	599.22	27.01
	3	54.93	5.09	1.24	562.15	25.96
	mean	64.86	6.03	1.23	617.92	25.74

ตารางผนวกที่ ค15 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน เมื่อผ่านการบ่มแรงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

MAH content (phr)	Sample	Load at break (N)	Tensile strength (Mpa)	300% Modulus (Mpa)	Elongation at break (%)	Gauge length (Strain source) (mm)
0.5	1	88.48	7.64	1.56	598.43	26.24
	2	76.09	6.6	1.48	596.56	26.51
	3	87.66	7.38	1.5	609.24	25.58
	mean	84.04	7.21	1.51	601.41	26.11
1.5	1	77.65	5.75	1.26	608.84	25.29
	2	83.51	6.27	1.26	667.01	26.57
	3	76.7	6.21	1.22	662.3	26.13
	mean	79.29	6.08	1.24	646.05	26
2.5	1	61.72	5.68	1.17	648.83	25.34
	2	58.27	5.61	1.24	641.33	26.10
	3	59.1	5.66	1.28	614.61	26.41
	mean	59.7	5.65	1.23	634.92	25.95



**ภาคผนวก ง**  
**ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด**

ตารางผนวกที่ ๑1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NR ที่ ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Sample No.	Thickness (mm)			Cs = $\frac{t_0 - t_r}{t_0 - t_s}$ x 100%
		Original, $t_0$	Final, $t_r$	Spacer bar, $t_s$	
0	1	12.44	11.1	9.5	45.58
	2	12.45	11.11	9.5	45.42
	3	12.48	11.1	9.5	46.31
	mean				45.58
30	1	12.44	11.02	9.5	48.5
	2	12.45	10.94	9.5	51.19
	3	12.43	10.07	9.5	49.83
	mean				49.83
50	1	12.47	10.77	9.5	57.24
	2	12.44	10.94	9.5	51.02
	3	12.46	10.84	9.5	54.73
	mean				54.33

ตารางผนวกที่ ๖2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง NBR ที่ ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Sample no.	Thickness (mm)			Cs = $\frac{\{t_0-t_f\}}{\{t_0-t_s\}}$ x 100%
		Original, $t_0$	Final, $t_f$	Spacer bar, $t_s$	
0	1	12.51	11.65	9.5	28.57
	2	12.48	11.92	9.5	18.79
	3	12.54	11.62	9.5	30.26
	mean				29.42
30	1	12.58	11.71	9.5	28.25
	2	12.57	11.76	9.5	26.38
	3	12.47	11.69	9.5	26.26
	mean				26.38
50	1	12.51	11.59	9.5	30.56
	2	12.53	11.62	9.5	30.03
	3	12.46	11.61	9.5	28.72
	mean				30.03



ภาคผนวก จ  
ผลการทดสอบความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมัน

ตารางผนวกที่ ๑1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองใน  
น้ำมันของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Sample no.	Initial mass (g)		Mass after immersion (g)		Change in volume
		In air	In water	In air	In water	
0	1	1.16	-0.05	2.1	-0.21	90.91
	2	1.12	-0.05	2.02	-0.19	88.87
	3	1.23	-0.08	2.19	-0.22	83.97
	mean					87.92
30	1	1.16	0.02	1.92	-0.15	81.58
	2	1.2	0.01	1.99	-0.13	78.15
	3	1.22	0.03	2.01	-0.15	81.51
	mean					80.41
50	1	1.27	0.04	1.99	-0.11	70.73
	2	1.32	0.04	2.02	-0.11	66.41
	3	1.32	0.04	2.02	-0.11	66.41
	mean					67.85

ตารางผนวกที่ ๑2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมันของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Sample no.	Initial mass (g)		Mass after immersion (g)		Change in volume
		In air	In water	In air	In water	
0	1	1.14	0.01	1.14	0	0.88
	2	1.13	0.01	1.13	0	0.89
	3	1.2	0.01	1.2	0	0.84
	mean					0.87
30	1	1.43	0.19	1.39	0.19	-3.22
	2	1.62	0.2	1.56	0.24	-7.04
	3	1.53	0.21	1.48	0.21	-3.79
	mean					-4.68
50	1	1.23	0.11	1.16	0.09	-4.46
	2	1.29	0.12	1.21	0.1	-5.13
	3	1.29	0.1	1.2	0.09	-6.72
	mean					-5.44

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมัน  
ของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน

ENR content (phr)	Sample no.	Initial mass (g)		Mass after immersion (g)		Change in volume
		In air	In water	In air	In water	
5	1	1.19	0.02	1.04	-0.11	75.21
	2	1.28	0.01	2.07	-0.13	73.23
	3	1.22	0.01	2.00	-0.13	76.03
	mean					74.82
10	1	1.20	0.02	1.98	-0.12	77.97
	2	1.27	0.02	2.06	-0.12	74.40
	3	1.16	0.03	1.91	-0.12	79.65
	mean					77.34
15	1	1.15	0.00	1.87	-0.11	72.13
	2	1.21	0.00	1.97	-0.11	71.90
	3	1.19	0.00	1.96	-0.11	73.95
	mean					72.66

ตารางผนวกที่ ๑4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมัน  
ของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน

CR content (phr)	Sample no.	Initial mass (g)		Mass after immersion (g)		Change in volume
		In air	In water	In air	In water	
5	1	1.18	0.01	1.94	-0.12	76.07
	2	1.27	0.03	2.09	-0.13	79.03
	3	1.29	0.01	2.12	-0.13	75.78
	mean					76.96
10	1	1.24	0.01	2.09	-0.12	79.67
	2	1.24	0.01	2.09	-0.15	82.11
	3	1.19	0.01	2.02	-0.11	80.51
	mean					80.76
15	1	1.23	0.03	2.02	-0.11	76.67
	2	1.17	0.03	1.97	-0.11	82.46
	3	1.19	0.03	2.00	-0.10	81.03
	mean					80.05

ตารางผนวกที่ ๑5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเมื่อผ่านการทดสอบการบวมพองในน้ำมัน  
ของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH ต่างๆ กัน

MAH content (phr)	Sample no.	Initial mass (g)		Mass after immersion (g)		Change in volume
		In air	In water	In air	In water	
0.5	1	1.37	0.02	2.44	-0.19	94.81
	2	1.35	0.01	2.36	-0.21	91.79
	3	1.33	0.01	2.34	-0.2	92.42
	mean					93
1.5	1	1.28	0.02	2.21	-0.17	88.89
	2	1.2	0.02	2.16	-0.18	98.31
	3	1.2	0.01	2.15	-0.17	94.96
	mean					94.05
2.5	1	1.27	0.01	2.27	-0.2	96.03
	2	1.22	0.01	2.19	-0.21	98.35
	3	1.21	0.01	2.21	-0.21	101.67
	mean					98.68



ตารางผนวกที่ ๑1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Burning time (Sec)			Average
0	92	110	100	101
30	108	118	114	113
50	132	134	136	134

ตารางผนวกที่ ๑2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NBR ที่ปริมาณ pPVC ต่างๆ กัน

pPVC content (phr)	Burning time (Sec)			Average
0	154	152	144	150
30	144	146	144	145
50	122	120	122	121

ตารางผนวกที่ ๑3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง ENR ต่างๆ กัน

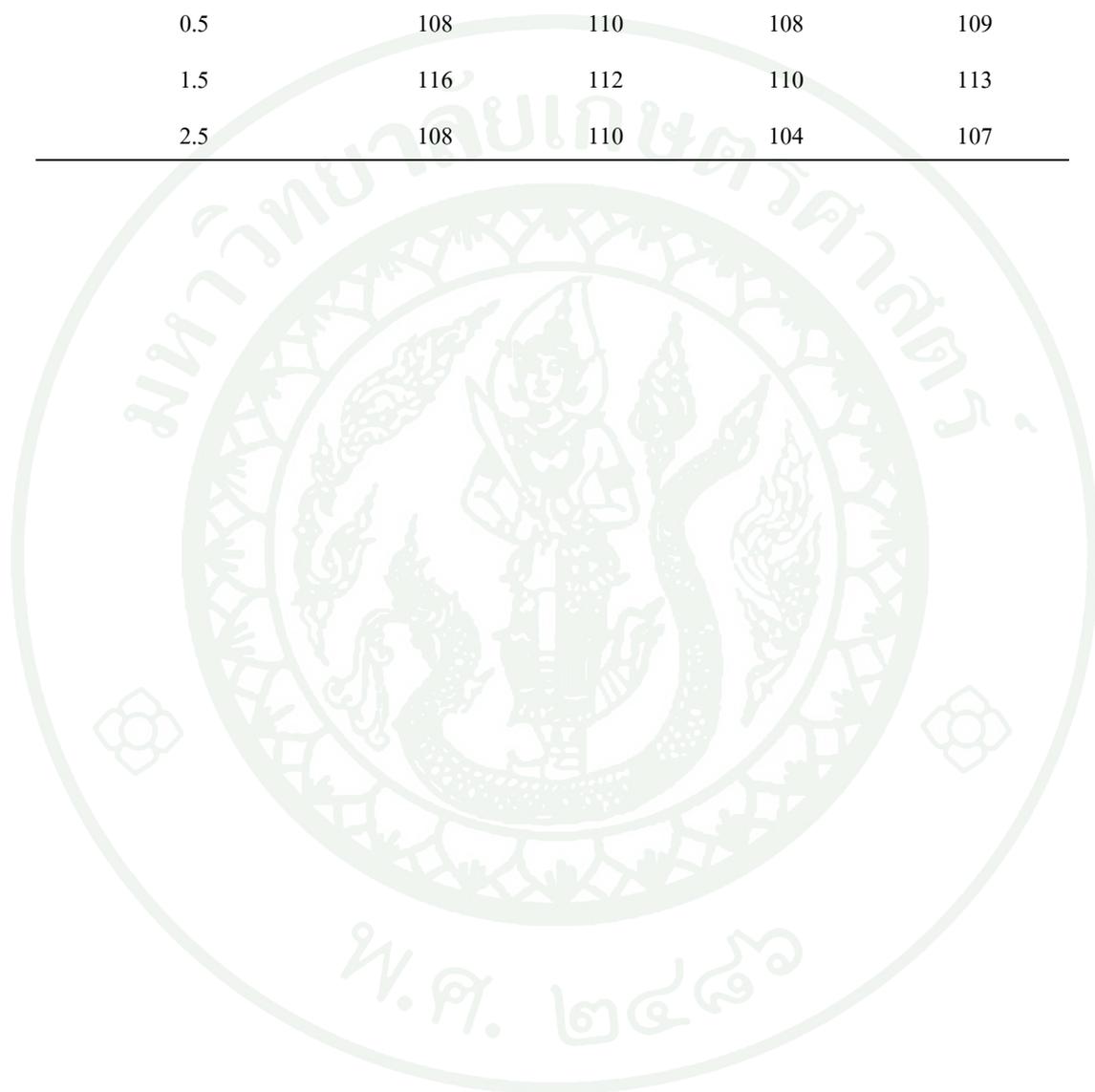
ENR content (phr)	Burning time (Sec)			Average
5	120	124	126	123
10	114	118	120	117
15	116	118	122	119

ตารางผนวกที่ ๑4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณยาง CR ต่างๆ กัน

CR content (phr)	Burning time (Sec)			Average
5	124	132	130	129
10	106	106	110	107
15	138	126	138	134

ตารางผนวกที่ ๑5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการลามไฟของยาง NR+pPVC30 ที่ปริมาณ MAH  
ต่างๆ กัน

MAH content (phr)	Burning time (วินาที)			Average
0.5	108	110	108	109
1.5	116	112	110	113
2.5	108	110	104	107





ภาคผนวก ข  
ผลงานทางวิชาการ

## Effect of Discarded pPVC Contents on Thermal and Ultraviolet Resistance of Acrylonitrile Butadiene Rubber

Sopit  
Somjate PATCHARAPHUN\* and Sittipong CHUYPUN

Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

### Abstract

Received Jan. 26, 2009

Accepted Apr. 27, 2009

In this investigation, the discarded plasticized-polyvinyl chloride (pPVC) from the extrusion of weather-seal was added into acrylonitrile butadiene rubber (NBR). Subsequently, the effects of pPVC contents on the mechanical properties, thermal, ultraviolet and swelling resistances of NBR were studied. The results indicated that scorch and cure time, tensile strength, hardness and swelling resistance increased with the increasing amount of pPVC added. Considering the thermal and ultraviolet resistances, it was observed that the mechanical properties of unfilled NBR decreased due to the desulphurization of the sulphur crosslinks and chain scission during heat and ultraviolet aging. However, the mechanical properties of the NBR containing varying amounts of pPVC were higher than that of unfilled NBR. This was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer and the PVC gelation phenomenon during heat and ultraviolet testing.

**Key words :** Acrylonitrile butadiene rubber, Plasticized polyvinyl chloride, Thermal and ultraviolet resistance.

### Introduction

Acrylonitrile butadiene rubber (NBR) or nitrile rubber is commonly considered the workhorse of the industrial and automotive rubber products industries. In the automotive area, NBR is used in fuel and oil handling hose, seals and grommets, and water handling applications. With a temperature range of  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$ , NBR can withstand all the most severe automotive applications. On the industrial side NBR finds uses in roll covers, hydraulic hoses, conveyor belting, and seals for all kinds of plumbing and appliance applications.<sup>(1,2)</sup>

Acrylonitrile (ACN) and butadiene (BD) ratios are varied for specific oil and fuel resistance and low temperature requirements. The ACN content is one of two primary criteria defining each specific NBR grade. The ACN level, by reason of polarity, determines several basic properties, such as oil and solvent resistance, low-temperature flexibility/glass transition temperature, and abrasion resistance. Higher ACN content provides improved solvent, oil and abrasion resistance, along with higher glass transition temperature. However, having the unsaturated backbone or the remaining double bond of the BD part can affect the property of NBR in terms of the aging resistance. In this

work, plasticized polyvinyl chloride was chosen as the strengthening and protective filler for NBR since PVC has a generally high resistance to the environment and ignition. Also, its mechanical strength is higher than that of NBR.<sup>(3)</sup> This investigation used the discarded pPVC from the extrusion of weather-seal. In general, the defective part of pPVC usually occurs at the beginning of the process. In case that the size of product does not conform to the specifications of the customers, these defective parts will be buried or burnt. The disposal process can cause pollution to the environment, especially the burning of PVC, which can produce the toxic HCl gas due to the thermal disintegration of PVC.<sup>(4)</sup> With the reasons mentioned earlier, the recycle or the reprocessing of the defective parts is very important. In addition to the possibility to improve the mechanical properties and aging resistance, the results of this work can also be used as guidelines to reduce production cost and environmental problems.

### Materials and Experimental Procedures

#### Materials

The materials employed in this investigation were acrylonitrile butadiene rubber (NBR) and

\*Corresponding author E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

plasticized-polyvinyl chloride (pPVC) supplied by Polyseal Track Co., Ltd. and Thai Profile Interplas Co., Ltd., respectively. The discarded pPVC extruded weather-seal was pulverized by crushing machine (supported by Thai Mangkorn Plastic Industry Co., Ltd.). The rotor speed and crushing time were controlled with respect to the particle size of pPVC as compared to the particle size of commercial fillers (125-375  $\mu\text{m}$ ).

### Experimental Procedures

NBR was masticated using the internal mixer at a temperature of 70°C for 3 minutes. The NBR was then mixed with the addition of the quantities of sulfur, pPVC, ZnO, and MBTS. Six compounds were produced according to the formulations in Table 1. Each compound was then rolled to produce a sheet approximately 3 mm thick by using a two-roll mill, and left at room temperature for 24 hours. The scorch and cure time were determined using the Oscillating Disk Rheometer (ODR) in accordance with a rubber standard test method (ASTM D 2084). The test specimens were prepared by the use of compression molding at a temperature of 160°C. Tensile and hardness tests were performed using an Instron tensile testing machine (ASTM D 412) and Shore hardness durometer (ASTM D 2240). The swelling, thermal and ultraviolet resistances were determined according to standard methods. The test procedures were specified in ASTM D 471-79, ASTM D 572, and ASTM D 4329, respectively.

**Table 1.** Formulations in part per hundred rubber (phr)

Ingredients	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
NBR	100	100	100	100	100	100
ZnO	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
Accelerator (MBTS)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Sulphur	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Retarder	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
pPVC	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0

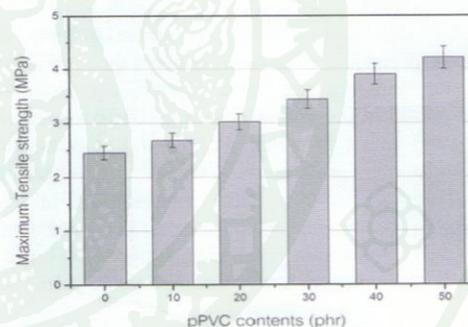
### Results and Discussion

Table 2 shows the influence of pPVC contents on the scorch and 90% cure time of NBR compounds at 160°C. It can be seen that as the pPVC content increased, the scorch time and cure time tended to increase. The increase in the scorch

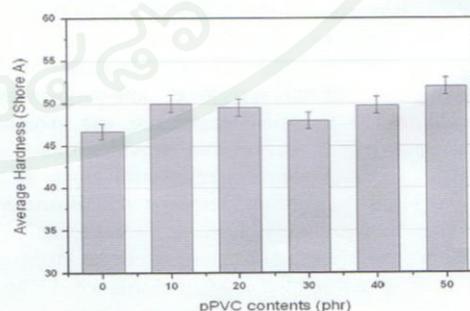
and cure time possibly due to the pPVC fillers retarded the reaction between sulphur and accelerator. Figures 1 and 2 show the changes in maximum tensile strength and hardness of the NBR filled with various pPVC contents. It can be observed that both properties gradually increased with increasing pPVC content. This was due to the fact that pPVC had a higher tensile strength and hardness compared to the NBR.<sup>(3)</sup> Therefore, adding pPVC into the NBR would lead to an increase in the tensile strength and hardness of the NBR.

**Table 2.** Scorch and cure time of NBR compounds at various pPVC contents

Formula	Scorch time	Cure time
Mix 1	3.75	7.58
Mix 2	3.50	10.33
Mix 3	3.67	8.50
Mix 4	4.00	9.75
Mix 5	4.33	10.42
Mix 6	4.42	10.67



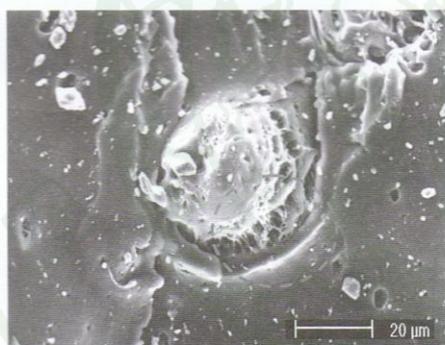
**Figure 1.** Effect of pPVC contents on maximum tensile strength of NBR



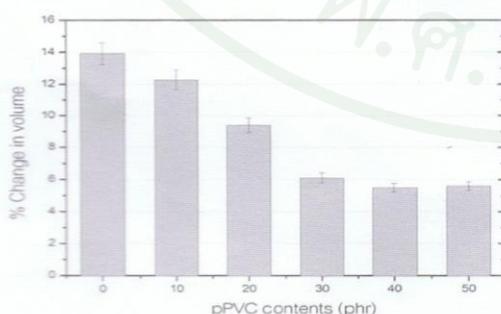
**Figure 2.** Effect of pPVC contents on hardness of NBR

*Effect of Discarded pPVC Contents on Thermal and Ultraviolet Resistance of Acrylonitrile Butadiene Rubber*

This study was further supplemented by scanning electron microscopic studies of the selected fracture surfaces. Figure 3 shows the selected fracture surface of the NBR sample filled with the highest pPVC content. It can be seen that the fracture surface of the sample shows the interfacial bonding between the pPVC particle and NBR matrix (as circled in Figure 3). Because the pPVC and NBR molecules were both polar, this made them compatible. As a result, the pPVC particles could effectively function as a reinforcing filler. The swelling behavior of NBR filled with various pPVC contents was measured by the sorption method as illustrated in Figure 4. It was found that NBR provided an excellent swelling resistance, with change in volume of NBR approximately was 14%. This was due to the polarity of NBR. As the pPVC content increased, the change in volume of NBR gradually decreased up to the pPVC content of 30 phr. An improvement of swelling resistance of NBR was thought to be caused by the high polarity of pPVC and the compatibility between pPVC and NBR, as mentioned earlier.

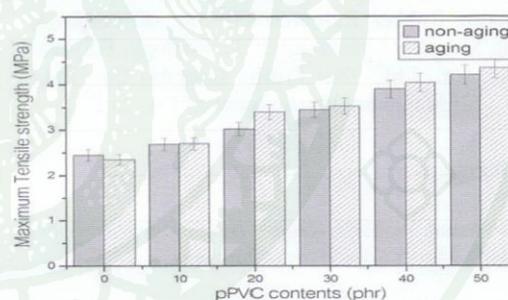


**Figure 3.** SEM micrograph of fracture surface for NBR filled with pPVC (50 phr)

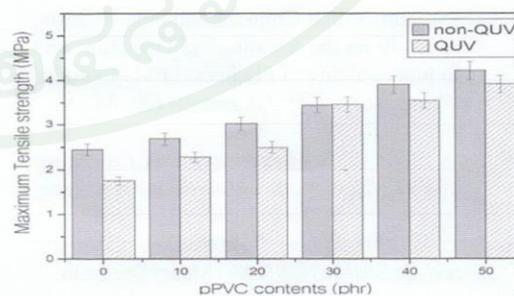


**Figure 4.** Change in volume after swelling test of NBR filled with various pPVC contents

The changes in the maximum tensile strength after thermal and ultraviolet aging tests for NBR filled with various pPVC contents are shown in Figures 5 and 6. It can be observed in Figure 5 that the maximum tensile strength of the unfilled NBR was slightly lower (in the case of heat aging) and much lower (in the case of UV aging, see Figure 6) than the values obtained for non-aging NBR. This was due to the remaining double bond and polysulphide crosslinks occurred in the conventional vulcanization, which can be attacked by heat and UV radiation, resulting in the chain scission of rubber molecules. However, it should be noted that the maximum tensile strength of NBR filled with pPVC was higher than that of unfilled NBR. Higher tensile strength was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer<sup>(5)</sup> and the PVC gelation phenomenon<sup>(4)</sup> which occurred during the processing of pPVC weather-seal, and subsequent compound preparation procedures (e.g. grinding, mixing and compounding). This could be related to the fact that the pPVC had a greater processing time and a more compact structure compared to the NBR matrix. Therefore, adding pPVC into the NBR would lead to an increase in the thermal and UV resistance of NBR.



**Figure 5.** Comparison of maximum tensile strength for heat aging and non-aging NBR filled with various pPVC contents



**Figure 6.** Comparison of maximum tensile strength for UV aging and non-aging NBR filled with various pPVC contents

## Conclusion

Plasticized PVC has been employed to enhance the properties of NBR with respect to mechanical and aging properties. It was found that scorch and cure time, tensile strength, as well as hardness and swelling resistance increased with increasing amount of pPVC added. Considering the effect of adding pPVC on the thermal and ultraviolet resistances, it was observed that the maximum tensile strength of the unfilled NBR tended to decrease due to the desulphurization of the sulphur crosslinks and chain scission during heat and ultraviolet aging. However, the maximum tensile strength of the NBR containing various contents of pPVC was higher than that of unfilled NBR. This was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer and the PVC gelation phenomenon during heat and ultraviolet exposure.

## Acknowledgement

The authors would like to express their thanks to the following institutes for their kind support: Rubber Research Institute of Thailand, King Mongkut University of Technology, Polyseal Track Co., Ltd., Thai Profile Interplas Co., Ltd., and Thai Mangkorn Plastic Industry Co., Ltd.

## References

1. Hofmann, W. 1989. *Rubber Technology Handbook*. New York : Hanser Publishers.
2. Blow, C.M. and Hepburn, C. 1978. *Rubber Technology and Manufacture*. 2<sup>nd</sup> ed. London : Butterworth Scientific.
3. Patcharaphun, S. and Chinkamonthong, R. 2008. A Study on the Rheological Properties and Reprocessability of Plasticized PVC Extruded Weatherseals. *Eng. J. Kasetsart* **65** : 48-59.
4. Burgess, R.H. 1982. *Manufacture and Processing of PVC*. New York : Macmillan Publishing.
5. Rodgers, B. 2004. *Rubber Compounding: Chemistry and Application*. New York : Marcel Dekker Inc.



## Effect of Plasticized Poly(vinyl chloride) Contents on Mechanical and Aging Properties of Nitrile Rubber

**Sopid Chuvpun**, Chatchanee Intarakasame, and Somjate Patcharaphun

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering,  
Kasetsart University, Bangkok 10900

### Abstract

In this study, the effects of plasticized Poly(vinyl chloride), pPVC, contents on the rheological, mechanical and physical properties of Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR) were investigated. The NBR compounds and vulcanizates were characterized with respect to scorch and cure time, tensile strength, hardness, and swelling behavior. The effect of adding pPVC on the thermal and ultraviolet resistances was also investigated. The results indicated that scorch and cure time, tensile strength, hardness and swelling resistance increased with the increasing amount pPVC added. Considering the thermal and ultraviolet resistances, it was observed that the mechanical properties of unfilled NBR decreased due to the desulphurization of the sulphur crosslinks and chain scission during heat and ultraviolet aging. However, the mechanical properties of the NBR containing varying amounts of pPVC were higher than that of unfilled NBR. This was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer and the PVC gelation phenomenon during heat and ultraviolet testing.

### Introduction

Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR) or nitrile rubber is commonly considered the workhorse of the industrial and automotive rubber products industries. In the automotive area, NBR is used in fuel and oil handling hose, seals and grommets, and water handling applications. With a temperature range of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , NBR can withstand all the most severe automotive applications. On the industrial side NBR finds uses in roll covers, hydraulic hoses, conveyor belting, and seals for all kinds of plumbing and appliance applications<sup>[1,2]</sup>.

Acrylonitrile (ACN) and butadiene (BD) ratios are varied for specific oil and fuel resistance and low temperature requirements. The ACN content is one of two primary criteria defining each specific NBR grade. The ACN level, by reason of polarity, determines several basic properties, such as oil and solvent resistance, low-temperature flexibility/glass transition temperature, and abrasion resistance. Higher ACN content provides improved solvent, oil and abrasion resistance, along with higher glass transition temperature. However, having the unsaturated backbone or the remaining double bond of the BD part can affect the property of NBR in terms of the aging resistance. In this work, Plasticized Poly(vinyl chloride) was chosen as the strengthening and protective

filler for NBR. Since PVC has a generally high resistance to the environment and ignition. Also its mechanical strength is higher than that of NBR<sup>[3]</sup>. This investigation used the discarded pPVC from the extrusion of weather-seal. In general, the defective part of pPVC usually occurs at the beginning of the process. In case that the size of product does not conform to the specifications of the customers, these defective parts will be buried or burnt. The disposal process can cause pollution to the environment especially the burning of PVC, which can produce the toxic HCl gas due to the thermal disintegration of PVC<sup>[4]</sup>. With the reasons mentioned earlier, the recycle or the reprocessing of the defective parts is very important. In addition to the possibility to improve the mechanical properties and aging resistance, the results of this work can also be used as the guidelines to reduce the production cost and the environmental problems.

### Experimental procedures and methods

NBR was masticated using the internal mixer at the temperature of  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 3 minutes. The NBR was then mixed with the addition of the quantities of sulfur, pPVC, ZnO, and MBTS. Six compounds were produced according to the formulations in Table 1. Each compound was then rolled to produce a sheet approximately 3 mm thick by using a two-roll mill and left at room temperature for 24 hours.

The scorch and cure time were determined using the Oscillating Disk Rheometer (ODR) in accordance with a rubber standard test method (ASTM D 2084). The test specimens were prepared by the use of compression molding at a temperature of  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tensile and hardness tests were performed using an Instron tensile testing machine (ASTM D 412) and Shore hardness durometer (ASTM D 2240). The swelling, thermal and ultraviolet resistances were determined according to standard methods. The test procedures were specified in ASTM D 471-79, ASTM D 572, and ASTM D 4329 respectively.

Table 1 Formulations in part per hundred rubber (phr)

Ingredients	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
NBR	100	100	100	100	100	100
ZnO	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
Accelerator (MBTS)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
Sulphur	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Retarder	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
pPVC	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0



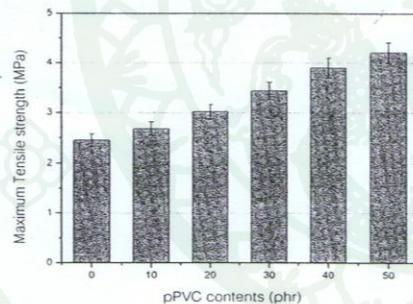
### Results and Discussion

Table 2 shows the influence of pPVC contents on the scorch and 90% cure time of NBR compounds at 160 °C. It can be seen that as the pPVC content increased, the scorch time and cure time tended to increase. The increase in the scorch and cure time possibly due to the pPVC fillers retarded the reaction between sulphur and accelerator.

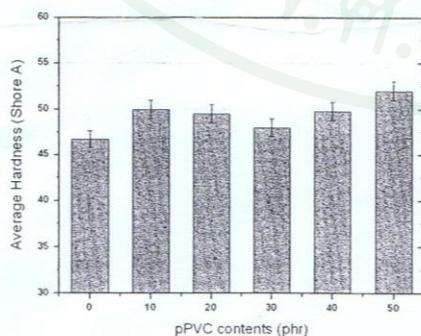
**Table 2** Scorch and cure time of NBR compounds at various pPVC contents

Formula	Scorch time	Cure time
Mix1	3.75	7.58
Mix2	3.50	10.33
Mix3	3.67	8.50
Mix4	4.00	9.75
Mix5	4.33	10.42
Mix6	4.42	10.67

Figures 1 and 2 show the changes in maximum tensile strength and hardness of the NBR filled with various pPVC contents. It can be observed that both properties gradually increased with increasing pPVC content. This was due to pPVC had a higher tensile strength and hardness as compared to the NBR [3]. Therefore, adding pPVC into the NBR would lead to an increase in the tensile strength and hardness of the NBR.



**Figure 1** Effect of pPVC contents on maximum tensile strength of NBR



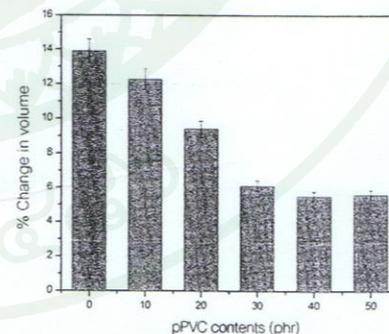
**Figure 2** Effect of pPVC contents on hardness of NBR

This study was further supplemented by scanning electron microscopic studies of the selected fracture surfaces. Figure 3 shows the selected fracture surface of NBR sample filled with the highest pPVC content. It can be seen that the fracture surface of the sample shows the interfacial bonding between the pPVC particle and NBR matrix (as circled in the Figure 3). Because the pPVC and NBR molecules were both polar, this made them compatible. As a result, the pPVC particles could effectively function as a reinforcing filler.



**Figure 3** SEM micrograph of fracture surface for NBR filled with pPVC (50 phr)

The swelling behavior of NBR filled with various pPVC contents was measured by the sorption method as illustrated in Figure 4. It was found that NBR provided the excellent of swelling resistance, with the change in volume of NBR approximately was 14%. This was due to the polarity of NBR. As the pPVC content increased, the change in volume of NBR gradually decreased up to the pPVC content of 30 phr. An improvement of swelling resistance of NBR was thought to be caused by the high polarity of pPVC and the compatibility between pPVC and NBR, as mentioned earlier.



**Figure 4** Change in volume after swelling test of NBR filled with various pPVC contents

The changes in the maximum tensile strength after thermal and ultraviolet aging tests for NBR filled with various pPVC contents are shown in Figures 5 and 6. It can be observed from Figure 5 that the maximum tensile strength of the unfilled NBR was slightly lower (in the case of heat aging) and much lower (in the case of UV aging, see Figure 6) than the values obtained for non-



aging NBR. This was due to the remaining double bond and polysulphide crosslinks occurred in the conventional vulcanization, which can be attacked by heat and UV radiation, resulting in the chain scission of rubber molecules. However, it should be noted that the maximum tensile strength of NBR filled with pPVC was higher than that of unfilled NBR. Higher tensile strength was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer [5] and the PVC gelation phenomenon [4] which occurred during the processing of pPVC weather-seal, and subsequent compound preparation procedures (e.g. grinding, mixing and compounding). This could be related to the fact that the pPVC had a greater processing time and a more compact structure comparing to the NBR matrix. Therefore, adding pPVC into the NBR would lead to an increase in the thermal and UV resistance of NBR.

due to the desulphurization of the sulphur crosslinks and chain scission during heat and ultraviolet aging. However, the maximum tensile strength of the NBR containing various contents of pPVC was higher than that of unfilled NBR. This was probably associated with the escape and/or degradation of plasticizer and the PVC gelation phenomenon during heat and ultraviolet exposure.

#### Acknowledgement

The authors would like to express their thanks to the following institutes for their kind support: Rubber Research Institute of Thailand, King Mongkut University of Technology, Polyseal Track Co., Ltd., Thai Profile Interplas Co., Ltd., and Thai Mangkorn Plastic Industry Co., Ltd.

#### References

- [1] Hofmann, W., Rubber Technology Handbook, Hanser Publishers, New York, 1989.
- [2] Blow, C.M. and Hepburn, C., Rubber Technology and Manufacture, Second Ed., Butterworth Scientific, London, 1978.
- [3] Chinkamonthong, R., A Study on The Rheological Properties and Reprocessibility of Plasticized PVC Extruded Weatherseals, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 2008.
- [4] Burgess, R.H., Manufacture and Processing of PVC, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1982.
- [5] Scheirs, J., Polymer Recycling: Science, Technology and Applications, John Wiley & Sons, New York, 1998.

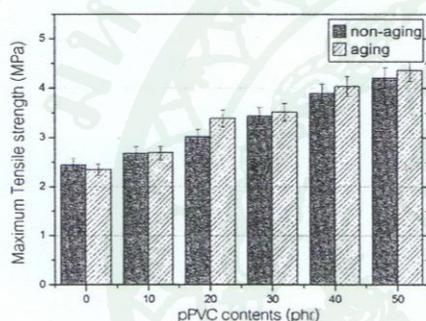


Figure 5 Comparison of maximum tensile strength for heat aging and non aging NBR filled with various pPVC contents

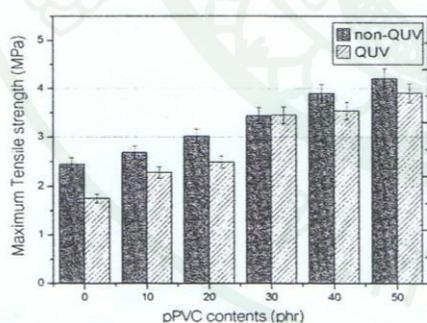


Figure 6 Comparison of maximum tensile strength for UV aging and non aging NBR filled with various pPVC contents

#### Conclusion

The plasticized PVC has been employed to enhance the properties of NBR with respect to the mechanical and aging properties. It was found that scorch and cure time, tensile strength, hardness and swelling resistance increased with the increasing amount pPVC added. Considering the effect of adding pPVC on the thermal and ultraviolet resistances, it was observed that the maximum tensile strength of the unfilled NBR tended to decrease

