



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้เศษยางอีวีเอที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้าเป็นสารตัวเติม
ในยางอีพีดีเอ็มเบลนด์ ยางธรรมชาติ และพลาสติก

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เสาวนีย์ ก่ออุดมกุลรังษี

14 มิถุนายน 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้เศษยางอีวีเอที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้าเป็นสารตัวเติม
ในยางอีพีดีเอ็มเบลนด์ยางธรรมชาติ และพลาสติก

(Utilization EVA wastes from shoes manufacturer as a filler
in EPDM/NR and plastic blends)

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เสาวนีย์ ก่อวุฒิภูรังษี และคณะ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการ การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปของผู้บริหาร
(Executive Summary)

ชื่อโครงการ : การใช้เศษยางอีวีเอที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้าเป็นสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็มเบลนด์
ยางธรรมชาติ และพลาสติก

(Utilization EVA wastes from shoes manufacturer as a filler in EPDM/NR and plastic blends)

หัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล : ผศ. เสาวนีย์ ก่อวุฒิภูรังษี

หน่วยงาน : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ที่อยู่ : 181 ถนนเจริญประดิษฐ์ อ.เมือง จ.ปัตตานี

โทรศัพท์/โทรสาร : 073 312213 / 073 331099

E-mail : ksaovane@bunga.pn.psu.ac.th

งบประมาณทั้งโครงการ จาก สกว. ...130,000...บาท

ระยะเวลาดำเนินงาน 11 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2552 ถึง 14 มิถุนายน พ.ศ. 2553

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

โรงงานผลิตรองเท้ามีเศษยาง EVA เหลือจากกระบวนการผลิตประมาณ 20% ของแผ่นยางที่ผลิต ทำให้แต่ละวันมีเศษวัสดุหรือเศษแผ่นยางที่ต้องทิ้งเป็นจำนวนมาก การนำเศษยาง EVA ที่เป็นของเสียกลับมาใช้ใหม่เป็นการลดปัญหาขยะและลดสารก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ผู้วิจัยและคณะ (2551)¹ ได้ศึกษาเบื้องต้นนำเศษยาง EVA มาใช้ใหม่ โดยนำมาบดผสมเป็นสารตัวเติมลงในยาง EPDM ได้ยางที่มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อม และสามารถแปรรูปได้ง่าย ยางคอมปาวด์ EPDM สามารถใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมได้ปริมาณสูงถึง 300 phr โดยยาง EPDM วัลคาไนซ์ที่ใส่เศษยาง EVA ปริมาณ 200 phr ให้สมบัติทางกายภาพดีที่สุด นอกจากนี้ยางคอมปาวด์ EPDM ที่มีเศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม 200 phr มาผสมกับพลาสติกชนิด LDPE (Low density polyethylene) สามารถแปรรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาต่อขอความเป็นไปได้ในการนำยาง EPDM/NR ที่มี EVA เป็นสารตัวเติมในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วนำมาเบลนด์กับพลาสติก เพื่อทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติก โดยมี EVA ใช้เป็นสารตัวเติมลดราคาค้นทุน ช่วยลดปริมาณเศษยางที่เหลือใช้ในอุตสาหกรรมผลิตรองเท้า

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์เศษยางอีวีเอที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้า เป็นสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็มเบลนด์ยางธรรมชาติ และพอลิเอทรีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ลดปริมาณเศษแผ่นยางที่ก่อให้เกิดปัญหาขยะต่อสิ่งแวดล้อม

¹ โครงการวิจัย IPUS1: เลขที่โครงการ I151A05003-4

ผลการดำเนินงาน

เศษยาง EVA จากอุตสาหกรรมรองเท้าฟองน้ำ มีลักษณะเป็นฟองยาง มีขนาดแตกต่างกัน ศึกษาข้อยาง เศษยาง EVA ให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ 3 วิธี โดยใช้เครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง เครื่องบดพลาสติก และเครื่อง เอกซทูด พบว่าวิธีที่เหมาะสมที่ใช้ข้อยาง เศษยาง EVA ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมใส่ในยางเบลนด์ ระหว่าง NR/EPDM คือ การนำเศษยาง EVA มารีดด้วยเครื่อง 2 ลูกกลิ้ง ต่อจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก พบว่าเทคนิคที่เหมาะสมในการเบลนด์ยางระหว่าง NR/EPDM คือ เทคนิค Master batch I โดยจะนำมาผสม สารเคมีทุกชนิดลงไปในช่วง EPDM ก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปผสมกับยางธรรมชาติ ศึกษากระบวนการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมต่อยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ 3 ระบบคือ กัมมะถัน เปอร์ออกไซด์ และ ระบบผสม พบว่า ระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมต่อยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM คือ ระบบกัมมะถัน

การเบลนด์ยาง NR/EPDM โดยแปรสัดส่วนระหว่าง NR/EPDM ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 50/50, 40/60, 30/70 และ 0/100 พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ส่งผลให้ ค่าทอร์คต่ำสุด (ML), ค่าทอร์คสูงสุด (MH), และเวลาสก็อต (TS_2) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index) มีค่าลดลง ยางเกิดการ Reversion ลดลง ส่วนยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 30/70 และ 0/100 ลักษณะการวัลคาไนซ์จะเป็น แบบ Marching สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM จะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรง ส่วนค่า 100% และ 300% มอดูลัส เพิ่มขึ้นทั้ง ก่อนและหลังการบ่มแรง

ยางเบลนด์ NR/EPDM ใส่เศษยาง EVA 150, 200, 250, 300 และ 350 phr พบว่า การเพิ่มปริมาณของ เศษยาง EVA ทำให้ ค่าทอร์คต่ำสุด (ML) และเวลาสก็อต (TS_2) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าทอร์คสูงสุด (MH) ลดลงและอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index) ช้าลง ซึ่งเศษยาง EVA สามารถใช้เป็นสารตัวเติมในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ปริมาณสูงสุดเท่ากับ 350 phr โดยสมบัติของยางที่ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมมีค่า ความหนืด ความแข็ง การดูดกลืนพลังงาน และการสึกหรอ เพิ่มขึ้นตามของเศษยาง EVA ที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง

ยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ใส่เศษยาง EVA ปริมาณเท่ากัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด หลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีสูงกว่าสมบัติยางที่วางไว้ในสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน

พอลิเมอร์เบลนด์ NR/EPDM ที่ใส่เศษยาง EVA 350 phr แปรปริมาณของ LDPE ที่สัดส่วน NR-EPDM-EVA /LDPE เท่ากับ 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 และ 30/70 พบว่า ความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของ LDPE ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการยืดจนขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก และการบวมพองต่อตัวทำละลายมีค่าลดลง หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนมีค่าลดลง โดยลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของ LDPE มีผลทำให้ขนาดของเฟสยางจะมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงเห็นว่าเศษยาง EVA จากอุตสาหกรรมรองเท้า สามารถนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ ทำให้ลดปริมาณเศษยาง EVA ที่ก่อให้เกิดปัญหาขยะต่อสิ่งแวดล้อมได้

สรุปผลการวิจัย

เศษยาง EVA จากอุตสาหกรรมรองเท้า สามารถนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการนำมาบดให้มีขนาดเล็ก ด้วยเครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง และเครื่องบดพลาสติก นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางเบส NR/EPDM โดยการเพิ่มปริมาณเศษยาง EVA ทำให้ ค่าทอร์คต่ำสุด (ML) และเวลาสก็อต (TS₂) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าทอร์คสูงสุด (MH) ลดลง และอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index) ช้าลง สมบัติความหนืด ความแข็ง การดูดกลืนพลังงาน และความทนทานต่อการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษยาง EVA ที่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง พอลิเมอร์เบส NR/EPDM ที่ใส่เศษยาง EVA 350 phr และแปรปริมาณของ LDPE ที่สัดส่วน NR-EPDM-EVA /LDPE เท่ากับ 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 และ 30/70 พบว่า ความแข็ง และความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของ LDPE ที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติความสามารถในการยืดจนขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก และการบวมพองต่อตัวทำละลายมีค่าลดลง หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 ° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลง ลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ของพอลิเมอร์เบสระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE พบว่า LDPE สัดส่วนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขนาดของเฟสยางมีขนาดใหญ่ขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมการใช้วัตถุดิบชนิด thermoplastic มีส่วนผสมของยาง EVA ที่เบสระหว่าง NR/EPDM ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางรองพื้นปูทางเดินระบายน้ำ ขึ้นรูปด้วยเทคนิค injection molding ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติทนทานต่อการใช้งาน มีความเสียดทานสูง ป้องกันการลื่นไถล และสามารถจำหน่ายได้เชิงการค้า

ผลงานวิชาการ

เผยแพร่ผลงานในรูปแบบโปสเตอร์ เรื่อง “การประยุกต์ใช้เศษ EVA ที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้า” ในการประชุมวิชาการวันนักประดิษฐ์ ประจำปี 2553. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. ณ ฮอลล์ 9 ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุมอิมแพค เมืองทองธานี จ.นนทบุรี 2-5 กุมภาพันธ์ 2553

บทคัดย่อ

โรงงานผลิตรองเท้ามีเศษยาง EVA ที่เหลือจากกระบวนการผลิตประมาณ 20% ของแผ่นยางที่ผลิตได้ทั้งหมด ทำให้แต่ละวันมีเศษวัสดุหรือเศษแผ่นยางที่ต้องทิ้งเป็นจำนวนมาก การนำเศษยาง EVA ที่เป็นของเสียกลับมาใช้ใหม่ จะเป็นการลดปัญหาขยะและลดสารก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเศษยาง EVA จากอุตสาหกรรมรองเท้านำมาย่อยให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งและเครื่องบดพลาสติก แล้วนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ปริมาณ 150-350 phr การเพิ่มปริมาณเศษยาง EVA ในยางเบลนด์ NR/EPDM พบว่าความหนืด ความแข็ง การดูดกลืนพลังงาน และการสึกหรอ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70 ° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีค่าลดลงเล็กน้อย สำหรับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/EPDM เปรียบที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ใส่เศษยาง EVA ปริมาณ 350 phr ใช้ระบบวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถัน อัตราส่วนผสมยางเบลนด์ กับ LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 50/50, 40/60 และ 30/70 พบว่าการเพิ่มปริมาณ LDPE ส่งผลให้ความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการยืดจนขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก และการบวมพองในตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลง

Abstract

Shoe manufacturers producing many EVA rubber waste during the process. Approximately 20% of EVA scrap or waste rubber was produced in each day. Reused of EVA waste from shoe manufacturer can reduce waste and reduce pollutants of the environment. Therefore, this research of EVA from shoes industry was studied. The wasted EVA rubber was ground into small pieces using two roll mill and plastic grinder and was reused as filler in range of 150 – 350 phr for rubber blends. Increasing the amounts of wasted EVA in NR/EPDM would affect to increase the viscosity, hardness, energy adsorption and abrasion loss properties. While tensile strength, elongation at break and properties after aging at 70 °C for 72 hours were gradually decreased. For thermoplastic vulcanizates based on NR/EPDM and LDPE using two NR/EPDM blend ratios of 70/30 and 60/40 with EVA scrap of 350 phr and sulfur as a curing agent in rubber phase were prepared. Blend ratios of NR/EPDM and LDPE, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 and 30/70 were investigated. It was found that increasing of LDPE content increased hardness and tensile strength but decreased elongation at break, impact resistance and solvent swelling resistance of thermoplastic vulcanizate

สารบัญ

หน้า

บทสรุปของผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	iv
Abstract	iv
สารบัญ	v
สารบัญรูป	vii
สารบัญตาราง	ix

เนื้อหาวิจัย

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์	1
3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	1
4. วิธีการ	2
5. ผลการวิจัย	5
5.1 เทคนิคการย่อยเศษยาง EVA	5
5.2 เทคนิคการเบลนดฺยาง EPDM เบลนดฺ และยาง NR	6
5.2.1 การปรับความหนืด	6
5.2.2 เทคนิคการผสมยางเบลนดฺระหว่าง NR/ EPDM	6
5.2.3 สมบัติเชิงกลยางวัลคาไนซ์	7
5.3 ระบบการวัลคาไนซ์ และสมบัติ	9
ก) มอดูลัสที่ระยะยืด 100%	10
ข) ความต้านทานต่อแรงดึง	10
ค) ความสามารถในการยืดจนขาด	11
5.4 การแปรอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง NR และ EPDM	12
5.4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์	12
5.4.2 สมบัติเชิงกลยางวัลคาไนซ์	13
ก). มอดูลัสที่ระยะยืด 100%	13
ข) ความต้านทานต่อแรงดึง	14

ค) ความสามารถในการยืดจนขาด	14
5.5 การแปรส่วนผสมเศษยาง EVA ในยาง NR และ EPDM	15
5.5.1 สมบัติการวัลคาไนซ์	15
5.5.2 ความหนืด	17
5.5.3 ความแข็ง	17
5.5.4 การสึกหรอ	18
5.5.5 การดูดกลืนพลังงาน	20
5.5.6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	21
5.5.7 ความต้านทานต่อแรงดึง	23
5.5.8 ความสามารถในการยืดจนขาด	26
5.5.9 มอดุลัสที่ระยะยืด 100%	28
5.6 การผสมยางคอมปาวด์ร่วมกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	30
5.6.1 ความแข็ง	30
5.6.2 ความต้านทานต่อแรงดึง	31
5.6.3 ความสามารถในการยืดจนขาด	32
5.6.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทก	33
5.6.5 การบวมพอง	34
5.6.6 ลักษณะฐานวิทยาศาสตร์	34
6. สรุป	36
7. ข้อเสนอแนะ	37
8. เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ	38

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ของยางคอมปาวด์ ที่ผสมด้วยเทคนิคต่างๆ	6
รูปที่ 5.2 สมบัติ 100%มอดูลัสของยาง NR และยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่ผสมโดยเทคนิคต่างๆ	7
รูปที่ 5.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR และยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่ผสมโดยเทคนิคต่างๆ	7
รูปที่ 5.4 สมบัติความสามารถยืดจนขาดของยาง NR และยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่ผสมโดยเทคนิคต่างๆ	8
รูปที่ 5.5 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ของยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ระบบต่างๆ	9
รูปที่ 5.6 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของสูตรยางที่ใช้ระบบและอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	10
รูปที่ 5.7 ความต้านทานต่อแรงดึงของสูตรยางที่ใช้ระบบและอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	10
รูปที่ 5.8 ความสามารถในการยืดจนขาดของสูตรยางที่ใช้ระบบและอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	11
รูปที่ 5.9 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ของยางคอมปาวด์เบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ	12
รูปที่ 5.10 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	13
รูปที่ 5.11 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	14
รูปที่ 5.12 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	14
รูปที่ 5.13 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ	15
รูปที่ 5.14 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 250 phr	16
รูปที่ 5.15 ความเหนียวของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ	17
รูปที่ 5.16 ความแข็งของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 ใส่ EVA ปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	17
รูปที่ 5.17 ความแข็งของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 250 phr ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	18
รูปที่ 5.18 ความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติและยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam	19
รูปที่ 5.19 การสึกหรอของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ	19
รูปที่ 5.20 การดูกลิ่นพลังงานของยางธรรมชาติและยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam	20

รูปที่ 5.21 การดูกลืนพลังงานของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ	21
รูปที่ 5.22 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางธรรมชาติและยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam	22
รูปที่ 5.23 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ	22
รูปที่ 5.24 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	23
รูปที่ 5.25 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 60/40 โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	23
รูปที่ 5.26 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณ 250 phr ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	24
รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงหลังของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนเศษยาง EVA ปริมาณ 150-350 phr บ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C 72 ชั่วโมง และความทนต่อสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน	24
รูปที่ 5.28 ความสามารถในการยึดจุนขาดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	26
รูปที่ 5.29 ความสามารถในการยึดจุนขาดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 60/40 โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	26
รูปที่ 5.30 ความสามารถในการยึดจุนขาดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณ 250 phr ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	27
รูปที่ 5.31 ความสามารถในการยึดจุนขาดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM สัดส่วนต่างๆ ใส่เศษยาง EVA ปริมาณต่างๆ บ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงและหลังทดสอบทนทานต่อสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน	27
รูปที่ 5.32 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	28
รูปที่ 5.33 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนและเศษยาง EVA ปริมาณต่างๆ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และหลังทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน	29
รูปที่ 5.34 ความแข็งแรงพอลิเมอร์เบลนค์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ	30
รูปที่ 5.35 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบลนค์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	31
รูปที่ 5.36 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบลนค์ ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และหลังการทดสอบความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม 30 วัน	31
รูปที่ 5.37 ความสามารถในการยึดจุนขาดของพอลิเมอร์เบลนค์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง	32

รูปที่ 5.38 ความสามารถในการยืดตัวของพอลิเมอร์เบลดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงและ หลังการทดสอบความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม 30 วัน	32
รูปที่ 5.39 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่ สัดส่วนต่างๆ	33
รูปที่ 5.40 การบวมพองของพอลิเมอร์เบลดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ	34
รูปที่ 5.41 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลด NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound I สัดส่วน 70/30	35
รูปที่ 5.42 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลด NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound I สัดส่วน 30/70	35
รูปที่ 5.43 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลด NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound II สัดส่วน 70/30	35
รูปที่ 5.44 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลด NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound II สัดส่วน 30/70	36

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 สูตรยาง NR/EPDM และเทคนิคการผสม	3
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมยางและสารเคมี แปรรูประบบการวัลคาไนซ์	3
ตารางที่ 4.3 ส่วนผสมยางและสารเคมี ที่แปรรูปส่วนผสมยางปริมาณต่างๆ	4
ตารางที่ 4.4 ชนิดของยางและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของยางเบลดระหว่างยาง NR/ EPDM โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม	4
ตารางที่ 4.5 ชนิดของพอลิเมอร์และสารเคมีที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์เบลดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE	5
ตารางที่ 5.1 การย่อยเศษยาง EVA และลักษณะของเศษยาง EVA ที่ได้จากการย่อยโดยวิธีต่างๆ	5

เนื้อหาวิจัย

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

EVA (Ethylene vinyl acetate) เป็นพอลิเมอร์ที่มีการนำมาใช้ในโรงงานผลิตรองเท้าค่อนข้างมาก มีเศษยาง EVA ที่เหลือจากกระบวนการผลิตประมาณ 20% ของแผ่นยางที่ผลิตได้ทั้งหมดหรือไม่ต่ำกว่า 1 ตันต่อวัน หากอุตสาหกรรมผลิตรองเท้าแต่ละทั้งวัน 15,000 คู่ จะมีเศษวัสดุของแผ่นยาง EVA เหลือทิ้งประมาณ 2-3 ตัน ต่อวัน ดังนั้นจะเห็นว่าในแต่ละวันมีเศษวัสดุหรือเศษแผ่นยางที่เป็นเศษวัสดุที่เกิดจากกระบวนการผลิตรองเท้าจากแผ่นยาง EVA ในหลายขั้นตอน ซึ่งไม่ใช่แล้ว ต้องทิ้งเป็นจำนวนมาก มีการนำเศษวัสดุ EVA มาทำลายโดยการเผาหรือทิ้งไปเป็นขยะก่อให้เกิดเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้สูญเสียรายได้ หรือมูลค่าของวัตถุดิบของประเทศไปด้วย หากมีการนำเศษยาง EVA ที่เป็นของเสียกลับมาใช้ใหม่ จะเป็นการลดปัญหาขยะและลดสารก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาเบื้องต้นหาแนวทางการนำเศษยาง EVA มาใช้ใหม่ ด้วยการใช้เศษยางฟองน้ำ EVA ซึ่งเป็นเศษยาง EVA ที่มีสีดำจากอุตสาหกรรมผลิตพื้นรองเท้านำมาบดแล้วใช้ผสมเป็นสารตัวเติมลงในยาง EPDM ได้ยางที่มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อม และสามารถแปรรูปได้ง่าย ยางคอมปาวด์ EPDM สามารถใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมได้ปริมาณสูงถึง 300 phr โดยยาง EPDM วัลคาไนซ์ที่ใส่เศษยาง EVA ปริมาณ 200 phr ให้สมบัติทางกายภาพดีที่สุด อย่างไรก็ตามค่าความทนทานต่อแรงดึงยังค่อนข้างต่ำ (<10 MPa) ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาเพิ่มเติมใช้ยาง NR ซึ่งมีสมบัติด้านความทนทานต่อแรงดึงเบสตันดีกว่ายาง EPDM นอกจากนี้ผู้วิจัยและคณะได้ศึกษานำยางคอมปาวด์ EPDM ที่มีเศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม 200 phr มาผสมกับพลาสติกชนิด LDPE (Low density polyethylene) สามารถแปรรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจะศึกษาต่อยอดความเป็นไปได้ในการนำยาง EPDM / NR ที่มีเศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วนำมาเบลนดกับพลาสติก เพื่อทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเทอร์โมพลาสติก โดยมีเศษยาง EVA ใช้เป็นสารตัวเติมลดราคาต้นทุน แล้วช่วยลดปริมาณเศษยางที่เหลือใช้ในอุตสาหกรรมผลิตรองเท้า

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์เศษยางอีวีเอที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้าเป็นสารตัวเติมในยาง เบลนดระหว่าง EPDM /NR และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ลดปริมาณเศษแผ่นยางที่ก่อให้เกิดปัญหาขยะต่อสิ่งแวดล้อม

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

EVA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปโดยวิธีการอัดเข้าได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำที่ได้มีความเบา แข็งแรง สามารถรองรับน้ำหนักได้ดี ป้องกันการกระแทกของกล้ามเนื้อและกระดูก อุตสาหกรรมยางรองเท้าส่วนใหญ่จึงใช้ EVA เป็นวัตถุดิบผลิตยางรองเท้าฟองน้ำ หรือใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในการผลิตยางรองเท้ากีฬา เป็นต้น สำหรับการผลิตในโรงงานผลิตรองเท้ามีเศษยาง EVA ที่เป็นของเสียหรือเศษวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตค่อนข้างมากประมาณ 20% ของแผ่นยางที่ผลิตได้ทั้งหมด หรือไม่ต่ำกว่า 1 ตันต่อวัน ซึ่งเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตแผ่น EVA และรองเท้าจะมีเศษแผ่นยาง EVA เหลือจากกระบวนการผลิตในหลายขั้นตอน เช่น ขั้นตอนการปั๊มตัดรองเท้า การผ่าผิวยาง การตัดขอบให้ได้ขนาด โดยในแต่ละวันมีเศษวัสดุหรือเศษแผ่นยางที่ต้องทิ้งเป็นจำนวนมาก หากมีการนำเศษวัสดุ แผ่นยาง EVA ที่เป็นของเสียกลับมาใช้ใหม่ ก่อให้เกิดประโยชน์ เพิ่มมูลค่าเศษวัสดุที่ไม่ต้องการใช้ในอุตสาหกรรม จะเป็นการลดปัญหาขยะและลดสารก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้

การศึกษานำผงยางจากส่วนของ midsole และ outsole ของชิ้นส่วนรองเท้ากีฬา (Phinyocheep, 2002) ซึ่งเป็นส่วนผสมเป็นโฟม EVA/NR ผสมกับ SBR และ BR ตามลำดับ โดยการนำผงยางมาผสมกับโพลิโพรไพลีน

(Polypropylene) พบว่าการใส่พอลิเมอร์สไตรีนเอทิลีนบิวทิลีนสไตรีน (SEBS) และมาลิกอคราฟบน SEBS เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน สามารถเพิ่มสมบัติความทนทานต่อการกระแทกดีขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย และระยะยืดจนขาดมีค่าลดต่ำลง ส่วนจักรพงษ์ (2549) ได้นำยาง NR ที่ไม่ใช่แล้ว มาบดเป็นผง (crumb rubber, CRM) แล้วนำมาเบลนดักกับขบวนการพลาสติกชนิดโพลิโพรไพลีน (PP) ซึ่งผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าอัตราส่วน CRM/PPr 60/40 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เสาวนีย์ และจุฑารัตน์ (2551) ได้ศึกษาเบื้องต้นหาแนวทางการนำเศษยาง EVA มาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มมูลค่าหรือทำให้เกิดประโยชน์ ด้วยการใส่เศษยางฟองน้ำ EVA ที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งเป็นเศษยาง EVA ที่มีสีดำจากอุตสาหกรรมผลิตพื้นรองเท้า โดยเริ่มต้นนำมาบดแล้วใช้ผสมเป็นสารตัวเติมลงในยาง EPDM เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีราคาลดลง มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อม และสามารถแปรรูปได้ง่าย เสาวนีย์ อัญรัตน์ และ วุฒิชัย (2551) ศึกษาพบว่ายางคอมปาวด์ EPDM สามารถใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมได้ปริมาณสูงถึง 300 phr โดยยาง EPDM วัลคาไนซ์ที่ใส่เศษยาง EVA ปริมาณ 200 phr ให้สมบัติทางกายภาพดีที่สุด ยาง EPDM วัลคาไนซ์มีสมบัติความแข็งแรงและทนทานสภาพแวดล้อมดีกว่ายาง EPDM ที่ไม่ใส่เศษยาง EVA นอกจากนี้ผู้วิจัยและคณะได้นำยางคอมปาวด์ EPDM ที่มีเศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม 200 phr มาผสมกับพลาสติกชนิด LDPE (Low density polyethylene) พบว่าอัตราส่วนการผสมยาง EPDM compound/LDPE เท่ากับ 70/30 ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมดีที่สุด เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเป็นเวลานาน มีการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่ใช้ EVA ผสมในยาง NR (Jansen et and Soares., 1996)

ผู้วิจัยมีความเห็นว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นเทคโนโลยีวัสดุที่มีประโยชน์ สามารถนำวัสดุที่แปรรูปใช้งานแล้วกลับมาแปรรูปใช้งานได้อีก ด้วยการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องการต่อยอดงานวิจัยที่ได้ทำไปแล้ว โดยการใส่ยาง NR ที่มีสมบัติยืดหยุ่นดีเบลนดักกับยาง EPDM แล้วศึกษานำเศษยาง EVA ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมรองเท้ากลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยผสมเศษยาง EVA ในยาง EPDM คอมปาวด์ร่วมกับยาง NR ต่อจากนั้นนำมาผสมกับพลาสติก เพื่อทำเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) ซึ่งจะเป็นการประยุกต์ใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณทุนวัตถุดิบ

4. วิธีการ

4.1 เตรียมเศษยาง EVA บดให้มีขนาดเล็ก

4.2 ศึกษาเทคนิคการผสมเศษยาง EVA ร่วมกับยาง EPDM เบลนด์ และยาง NR

4.2.1 ปรับความหนืดของ NR ให้ใกล้เคียงกับยาง EPDM โดยบดยาง NR และ EPDM ด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้งอุณหภูมิ 30-40°C เป็นเวลา 0.5-4 นาที วัดความหนืดด้วยเครื่อง Mooney viscosity ตามมาตรฐาน ASTM D1646

4.2.2 ผสมยาง NR/ EPDM โดยเทคนิค 4 วิธี คือ

1) แบบ **Normal** ทำการผสมโดยนำ NR ที่ปรับความหนืดมาพ่นลูกกลิ้งเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นใส่ยาง EPDM และสารเคมีตามลำดับและเวลาที่แสดงในตารางที่ 4.1

2) แบบ **Reactive** ทำการผสมยาง EPDM ดังตารางที่ 4.1 แล้วนำไปทำการ pre-Heat ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา ก่อน ts, 0.5 นาที จากนั้นนำมารีดผ่านลูกกลิ้ง 1 นาที แล้วผสมร่วมกับ NR ที่ปรับความหนืดแล้ว เป็นเวลาอีก 4 นาที

3) แบบ **Master batch I** ผสมยาง EPDM ดังตารางที่ 4.1 แล้วนำมาผสมกับ NR ที่ปรับความหนืดแล้ว เป็นเวลาอีก 4 นาที

4) แบบ **Master batch II** ผสมยาง EPDM masterbatch II โดยใส่ลำดับสารเคมีและเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีการแยก ZnO และ Stearic Acid มาผสมกับ NR ช่วงที่ 2 โดยบดยาง NR เป็นเวลา 4 นาที ใช้เวลาผสม ZnO และ Stearic Acid อีก 2 นาที แล้วจึงนำมาผสมกับยาง EPDM masterbatch II

ตารางที่ 4.1 สูตรยาง NR/EPDM และเทคนิคการผสม

Technique of mixing		1. Normal	2. Reactive	3. Master batch I	4. Master batch II
Ingredients	phr	order_mins	order_mins	order_mins	order_mins
Natural Rubber	70	1_3	*	*	**
EPDM 7001	30	2_1	1_1	1_1	1_1
Zinc Oxide	4	3_1	2_1	2_1	**
Stearic Acid	2	4_2	3_2	3_2	**
Lowinox CPL	1	5_1	4_1	4_1	2_1
MBT/DPG	1.5	6_2	5_2	5_2	3_2
Sulphur	2.5	7_2	6_2	6_2	4_2

หมายเหตุ * NR ผสมหลังสุด (ช่วงที่สอง) ใส่ในยาง EPDM คอมปาวด์ ใช้เวลาผสม 4 นาที

** NR ผสม ZnO และ Stearic Acid ช่วงที่สอง แล้วใส่ในยาง EPDM คอมปาวด์ ใช้เวลาผสม 4 นาที
สำหรับสูตร NR (ไม่ผสมกับยาง EPDM) บดยาง NR 4 นาที แล้วใส่สารเคมีอื่นเช่นเดียวกับเทคนิค Normal

4.3. ศึกษากระบวนการวัลคาไนซ์ คือ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม

ส่วนผสมยางและสารเคมีซึ่งแปร ระบบวัลคาไนซ์ คือ ระบบ Sulphur, ระบบ Peroxide และ ระบบผสมของ Sulphur และ Peroxide (Mix) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมยางและสารเคมี แปรระบบการวัลคาไนซ์

Ingredients (phr)	Sulphur	Peroxide	Mix
Natural Rubber	70	70	70
EPDM 7001	30	30	30
Stearic Acid	2	-	-
Zinc Oxide	4	4	4
6 PPD	1	-	1
MBT	1.5	-	0.75
DCP	-	5	2.5
TAC	-	2	1
Sulphur	2.5	-	1.25

หมายเหตุ : การบดผสมยางทุกสูตรใช้เทคนิค ลำดับการผสม และเวลาในการผสมเหมือนกับยางสูตร Master Batch I

4.4. ศึกษาแปรอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง NR และ EPDM

ส่วนผสมยางและสารเคมี ที่แปรสัดส่วน NR/ EPDM ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (สูตรยาง NR และ ยาง EPDM ใช้สารเคมีเหมือนกันเพื่อใช้เป็นสูตรอ้างอิงเปรียบเทียบ)

ตารางที่ 4.3 ส่วนผสมยางและสารเคมี ที่แปรส่วนผสมยางปริมาณต่างๆ

Ingredients (phr)	NR/EPDM							
	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	30/70	0/100
Natural Rubber	100	90	80	70	60	50	30	-
EPDM 7001	-	10	20	30	40	50	70	100
Stearic Acid	2	2	2	2	2	2	2	2
ZnO	4	4	4	4	4	4	4	4
6 PPD	1	1	1	1	1	1	1	1
MBT	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

หมายเหตุ : การบดผสมยางทุกสูตรใช้เทคนิค ลำดับการผสม และเวลาในการผสมเหมือนกับยางสูตร Master Batch I

4.5 ศึกษาการแปรเศษยาง EVA ในยาง EPDM และยาง NR

ส่วนผสมยางและสารเคมี โดยการแปร NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ใส่เศษยาง EVA ที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ชนิดของยางและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของยางยางเบลนดระหว่างยาง NR/ EPDM โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม

Ingredients ** (phr)	NR/EPDM			
	80/20	70/30	60/40	50/50
Natural Rubber	80	70	60	50
EPDM 7001	20	30	40	50
Stearic Acid	2	2	2	2
ZnO	4	4	4	4
6 PPD	1	1	1	1
EVA scrap*	150-350	150-350	150-350	150-350
MBT	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5

หมายเหตุ : - * เศษยาง EVA ที่ใช้เป็นสารตัวเติมมีปริมาณดังนี้ 150, 200, 250, 300, และ 350 phr

** การบดผสมสารเคมีและยาง ทุกสูตรใช้เทคนิคแบบยางสูตร Master Batch I และใส่เศษยาง EVA เป็นลำดับสุดท้าย โดยใส่เศษยาง EVA ใช้เวลา 5 นาที

4.6 ศึกษาผสมยางคอมปาวด์ร่วมกับพลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ส่วนผสมยางและสารเคมีในหัวข้อ 4.5 โดยการแปรส่วนผสมการเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 และ 60/40 มีเศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 350 phr และใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Phenolic modified low

density polyethylene, Ph-LDPE) ปริมาณ 5 wt% ของปริมาณ LDPE (Hassan *et al*, 2003) ส่วนผสมของพอลิเมอร์และสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ชนิดของพอลิเมอร์และสารเคมีที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์เบสระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE

IngredientsI (by wt.)	Rubber Compound I					Rubber Compound II				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Rubber compound	70	60	50	40	30	70	60	50	40	30
LDPE	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70
Compatibilizers	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

หมายเหตุ : - Rubber Compound I ใช้สัดส่วน NR/EPDM ที่ 70/30 มีปริมาณของเศษยาง EVA 350 phr ตามตารางที่ 4.4

- Rubber Compound II ใช้สัดส่วน NR/EPDM ที่ 60/40 มีปริมาณของเศษยาง EVA 350 phr ตามตารางที่ 4.4

4.7 ตรวจสอบสมบัติกายภาพ ความแข็ง มอดุลัส และความต้านทานต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และ ASTM D412) เป็นต้น

4.8 ตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยา

5. ผลการวิจัย

5.1 เทคนิคการย่อยเศษยาง EVA

เศษยาง EVA ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมนำมาย่อยให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ 3 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 5.1

วิธีที่ 1 นำเศษยาง EVA มาบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วบดด้วยเครื่องบดพลาสติก

วิธีที่ 2 นำเศษยาง EVA มาบดผ่านเครื่องเอกซทูด

วิธีที่ 3 นำเศษยาง EVA มาบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปใส่ในเครื่องเอกซทูด

ตารางที่ 5.1 การย่อยเศษยาง EVA และลักษณะของเศษยาง EVA ที่ได้จากการย่อยโดยวิธีต่างๆ

วิธีการย่อยเศษยาง EVA	ลักษณะเศษยาง EVA
วิธีที่ 1 เศษยาง EVA รีดผ่านเครื่องบดสองลูกกลิ้ง อัตราส่วนความเร็วผิวลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง 1:1.25 ระยะห่างลูกกลิ้ง 2 มม. ที่อุณหภูมิห้อง ($28 \pm 2^{\circ}\text{C}$) แล้วนำมาย่อยให้มีขนาดเล็กลงอีกด้วยเครื่องย่อยพลาสติก	เศษยาง EVA ที่รีดจำนวน 10 รอบ ฟองอากาศจะถูกไล่ อากาศออกไป จะได้เป็นแผ่นบาง ความหนา ระหว่าง 2 – 5 มม. เมื่อตัดด้วยเครื่องบดพลาสติกแล้ว ลักษณะเป็นยางที่มี ขนาดเล็กใกล้เคียงกัน ขนาด 2 – 5 มม.
วิธีที่ 2 นำเศษยาง EVA ใส่ในเครื่องเอกซทูด โดยใช้ ความเร็วของสกรูที่ 20 รอบ/นาที่ ใช้อุณหภูมิของ หัว die ที่ 90°C	ยางจะมีทั้งที่มีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน เศษยางที่ได้ คงมีฟองอากาศในยางให้เห็นได้ชัด โดยยางที่มีขนาดเล็กคงมีฟองอากาศอยู่
วิธีที่ 3 เศษยาง EVA รีดผ่านเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (เหมือนวิธีที่ 1) แล้วนำไปใส่ในเครื่องเอกซทูด ที่ ความเร็วของสกรู 20 รอบ/นาที่ ใช้อุณหภูมิของ หัว die ที่ 90°C	ยางที่รีดจำนวน 10 รอบ ฟองอากาศจะถูกไล่ อากาศ ออกไป ยางแผ่นบางมีความหนา ระหว่าง 2-5 มม. เมื่อใส่ ในเครื่องเอกซทูด ลักษณะมีขนาดใหญ่และเล็กปะปน กัน ไม่สม่ำเสมอ

จากตารางที่ 5.1 ย่อยเศษยาง EVA จากการย่อยโดยวิธีต่างๆ พบว่า วิธีที่ 1 ลักษณะยางขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ จึงเลือกใช้เทคนิคนี้ในการย่อยยางให้มีขนาดเล็ก แล้วนำยางที่บดและย่อยแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 30 เมช เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

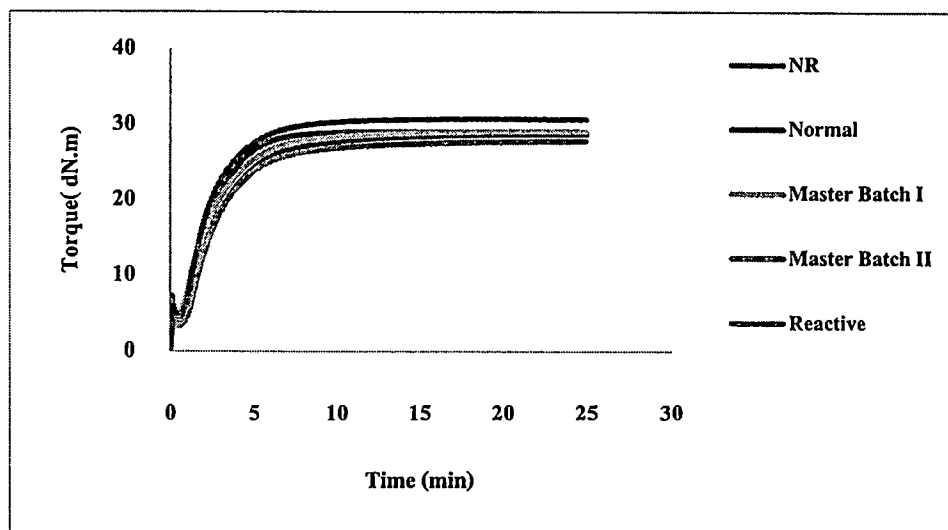
5.2 เทคนิคการเบลนดยาง EPDM เบลนด์ และยาง NR

5.2.1 การปรับความหนืด

บดยาง NR และ EPDM ด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้งขนาด 6x10 นิ้ว ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 2 มม. ความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง 1:1.25 อุณหภูมิ 30-40°C เป็นเวลา 0.5-4 นาที วัดความหนืดของยาง [ML_{1+4} (125°C)] ด้วยเครื่อง Mooney viscosity ที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่ายาง EPDM บดผ่านลูกกลิ้ง 0.5 นาที มีค่าความหนืด เท่ากับ 61 ML_{1+4} (125°C) ส่วนยาง NR นำมาบดที่ระยะเวลาต่างๆ (0.5-4 นาที) พบว่าค่าความหนืด [ML_{1+4} (125°C)] จะลดลงตามระยะเวลาที่บดยาง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางจะถูกแรงเฉือนของลูกกลิ้ง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาด ความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลง สายโซ่โมเลกุลยางจะเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น หลังจากบดยางดิบเป็นเวลา 3.5 นาที NR จะมีความหนืดค่าใกล้เคียงกับยาง EPDM ที่สุด ดังนั้นในการเบลนดยาง NR/EPDM จะบดยางดิบ NR เป็นเวลา 4 นาทีก่อน แล้วจึงนำ NR มาบดผสมร่วมกับยาง EPDM

5.2.2 เทคนิคการผสมยางเบลนด์ระหว่าง NR/ EPDM

ยาง NR/ EPDM ผสมด้วยเทคนิค 4 วิธี คือ เทคนิค Normal, เทคนิค Reactive, เทคนิค Master batch I และ เทคนิค Master batch II ตามหัวข้อที่ 4.2.2 ส่วนผสมของสูตรยาง NR/EPDM และเทคนิคการผสมดังตารางที่ 4.1 มีลักษณะการวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 5.1



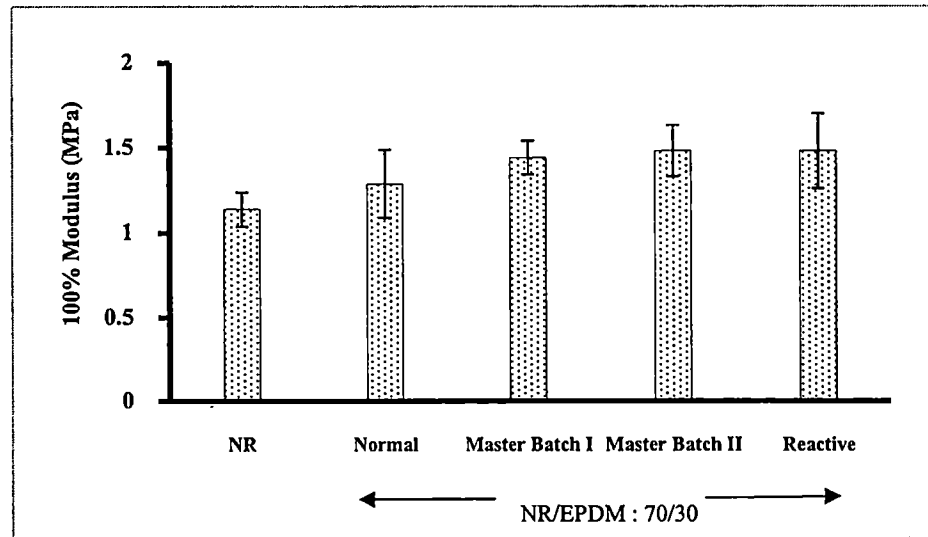
รูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ของยางคอมปาวด์ ที่ผสมด้วยเทคนิคต่างๆ

จากรูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ซึ่งผสมด้วยเทคนิค 4 วิธี พบว่าเทคนิค Normal และ Master batch I ยางคอมปาวด์มี Scorch time และ Cure time ใกล้เคียงกัน และอัตราการวัลคาไนซ์มีค่าอยู่ระหว่างเทคนิคแบบ Reactive และ Master Batch II โดยเทคนิค Reactive พบว่ายางคอมปาวด์มี Scorch time และ Cure time สั้น แต่มีค่า Torque สูงสุด เนื่องจากยาง EPDM master batch มีการนำมาทำการ pre-Heat ก่อนผสมกับยาง NR จึงทำให้ยาง EPDM มีช่วงเวลาของการเริ่มเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สั้นลง หลังจากนั้นจึงนำมาผสมกับยาง NR ส่งผลให้ยางในส่วน of EPDM

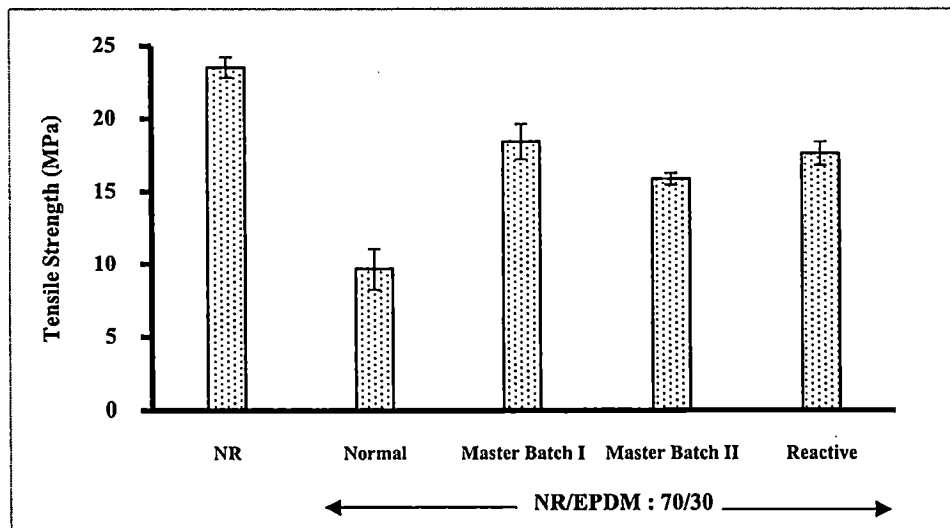
มีการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น ส่วนเทคนิค Master Batch II พบว่ายางคอมปาวด์มี Scorch time และ Cure time ยาว แต่มีค่า Torque ต่ำสุด อัตราการวัลคาไนซ์ช้าสุด เนื่องจากการผสมได้ ZnO และ Stearic acid ในยาง NR ก่อนนำไปบดผสมกับยาง EPDM จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในส่วนของยาง EPDM ช้าลง หลังการวัลคาไนซ์ ยางเบลดทั้ง 4 เทคนิค มีค่า Torque ไม่เปลี่ยนแปลง (Plateau cure)

5.2.3 สมบัติเชิงกลยางวัลคาไนซ์

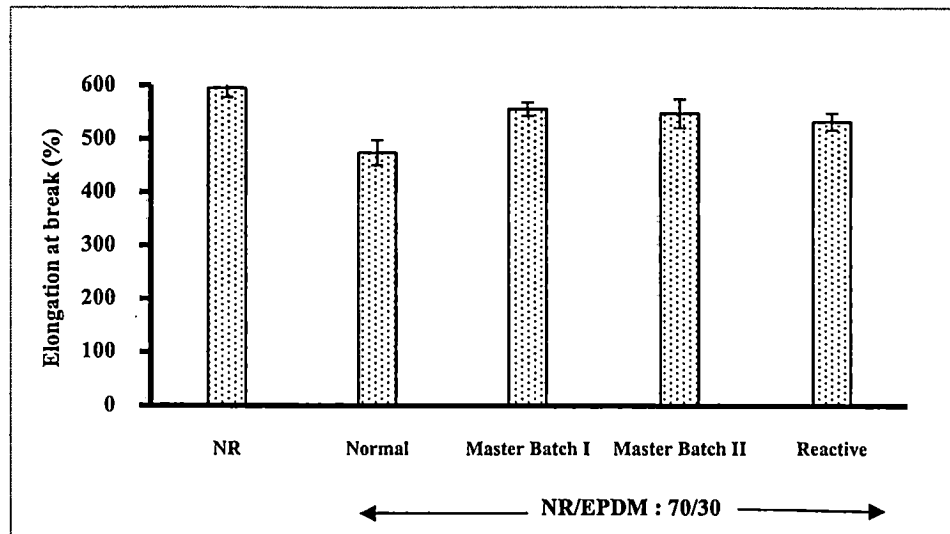
ยางวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยเทคนิค Normal, Reactive, Master batch I และ Master batch II มีสมบัติ 100%มอดูลัส, ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถยืดจนขาด ดังนี้



รูปที่ 5.2 สมบัติ 100%มอดูลัสของยาง NR และยางเบลดระหว่าง NR/EPDM ที่ผสมโดยเทคนิคต่างๆ



รูปที่ 5.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง NR และยางเบลดระหว่าง NR/EPDM ที่ผสมโดยเทคนิคต่างๆ



รูปที่ 5.4 สมบัติความสามารถยืดจนขาดของยาง NR และยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่ผสมโดยเทคนิคต่างๆ

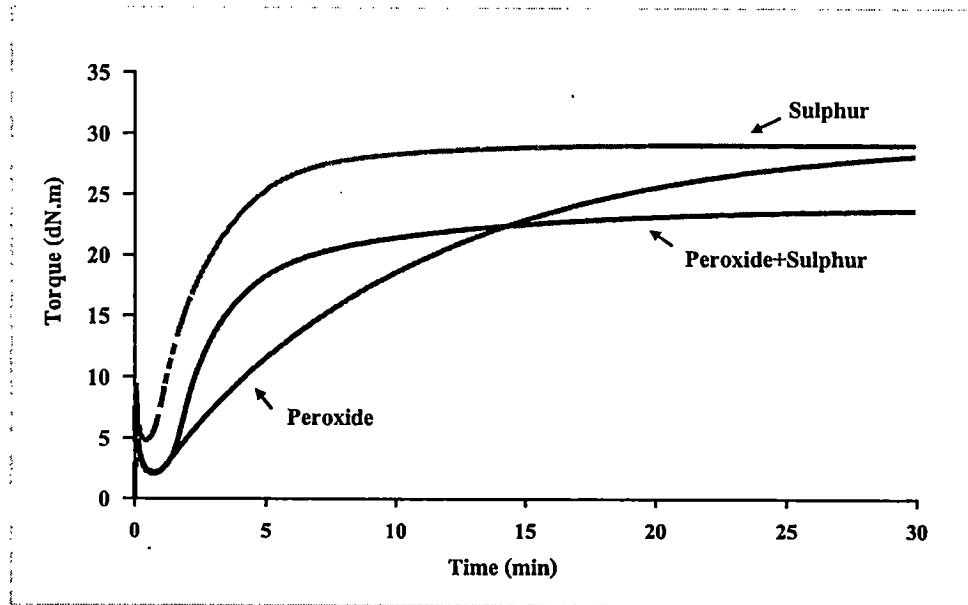
รูปที่ 5.2-5.4 จะเห็นว่าสมบัติ 100% มอดูลัสในยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ทั้ง 4 เทคนิค มีค่าสูงกว่ายางสูตร NR เนื่องจากยาง EPDM มีส่วนของเอทิลีนอยู่ถึง 73 % จึงทำให้ยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM มีความเป็นเทอร์โมพลาสติกสูง ค่ามอดูลัสจึงสูงกว่ายาง NR ส่วนสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด พบว่ายางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM มีค่าน้อยกว่า NR เนื่องจากขณะดึงยาง มีโครงสร้างโมเลกุลของ NR จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โมเลกุลเกิดการตกลึก ทำให้ยางมีความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมากกว่ายางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM

ส่วนเทคนิคในการผสมที่เหมาะสมยาง NR กับยาง EPDM พบว่าเทคนิค Master Batch I ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่สูงสุด โดยในขั้นตอนการบดผสมอุณหภูมิของยางจะอยู่ในช่วง 70 - 80°C สารเคมีทุกชนิดใส่ลงไปในส่วนของยาง EPDM ก่อนนำมาบดผสมกับ NR ทำให้ EPDM ในยางเบลนค์เกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น ส่วนเทคนิค Reactive มีขั้นตอนการบดผสมเช่นเดียวกับเทคนิค Master Batch I แต่เพิ่มขั้นตอนการนำยางคอมปาวด์ EPDM มา pre-Heat ที่เวลา ก่อน $t_{20.5}$ นาที จึงนำมาบดผสมกับ NR ทำให้ยาง EPDM ในยางเบลนค์เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็ว แต่พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถยืดจนขาดของยางมีค่าต่ำกว่าเทคนิค Master batch I สำหรับเทคนิค Master Batch II จะนำ ZnO และ Stearic acid ใส่ใน NR ก่อนนำไปบดผสมกับยาง EPDM Master Batch สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าเทคนิคการผสมแบบ Master Batch I และแบบ Reactive นอกจากนี้สมบัติความสามารถในการยืดจนขาดจะมีค่าต่ำกว่าเทคนิค Master Batch II เช่นเดียวกัน

ดังนั้นในการศึกษาเพื่อผสมเศษยาง EVA ลงไปในยางเบลนค์ จึงใช้เทคนิคการผสมแบบ **Master Batch I**

5.3 ระบบการวัลคาไนซ์ และสมบัติ

ยางเบลนด์ NR/EPDM ที่วัลคาไนซ์ที่ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม มีส่วนผสมของยางและสารเคมีที่แปรระบบการวัลคาไนซ์ ตามหัวข้อที่ 4.3 ตารางที่ 4.2 ตรวจสอบด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer 2000 มีลักษณะการวัลคาไนซ์ ของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C, แสดงดังรูปที่ 5.5

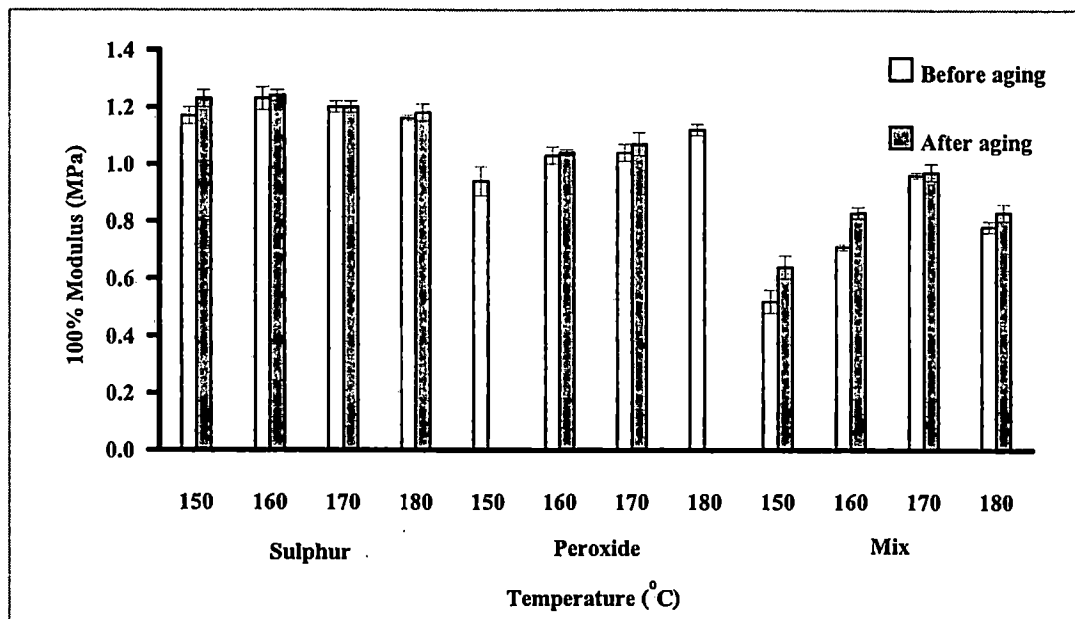


รูปที่ 5.5 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ของยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ระบบต่างๆ

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ระบบกำมะถันและระบบผสม เป็นแบบ Plateau และระบบเปอร์ออกไซด์จะเป็นแบบ Marching เนื่องจากยาง EPDM เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ช้า ส่วนอัตราการวัลคาไนซ์จะเห็นว่ายางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบกำมะถันจะมีอัตราการวัลคาไนซ์เร็วสุด รองลงมาคือระบบผสมและระบบเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากในระบบกำมะถันและระบบผสมมีสารกระตุ้นและสารตัวเร่ง ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จะทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นแบบอนุโมลิสระยะ ซึ่งมีทั้งการเชื่อมโยงและการแตกออกของพันธะ อัตราการวัลคาไนซ์จึงช้าสุด ส่วนระบบผสมจะมีอัตราการวัลคาไนซ์อยู่ระหว่างระบบกำมะถันและระบบเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในระบบนี้จะเป็นการผสมกันของสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง และสารกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของระบบกำมะถันและระบบเปอร์ออกไซด์

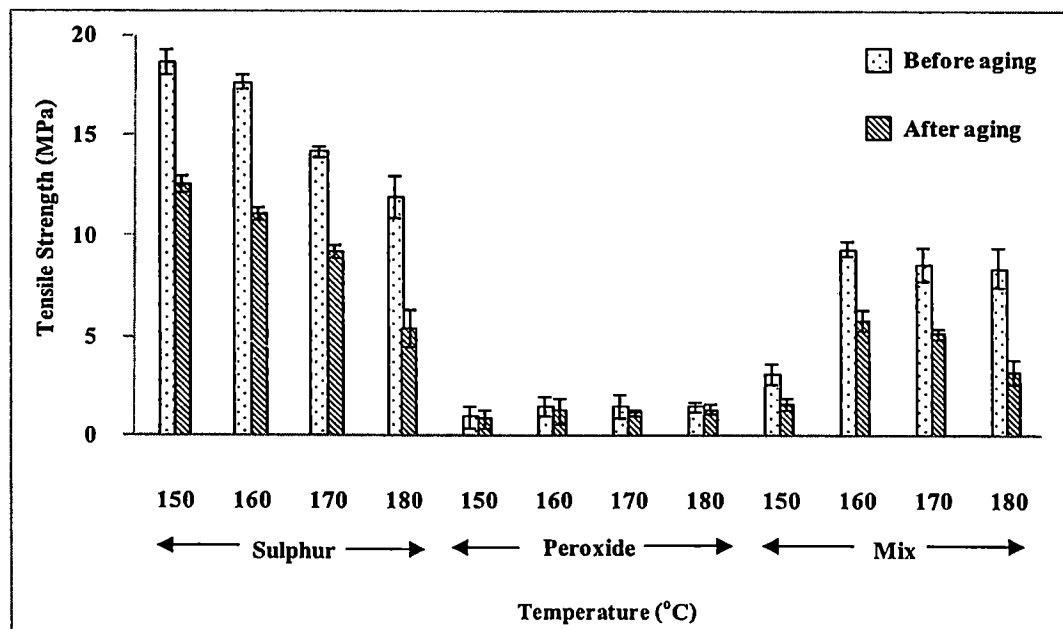
หากอุณหภูมิการวัลคาไนซ์สูงขึ้น (160 °C, 170 °C และ 180 °C) ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ทั้งสามระบบจะมีค่า Scorch time และ cure time ต่ำลง ซึ่งระบบกำมะถันและระบบผสม จะเกิด Reversion ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์ จะมีลักษณะการวัลคาไนซ์จะมีลักษณะแบบ Marching สำหรับสมบัติ 100%มอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.6-5.8 ตามลำดับ

ก) มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (100% Modulus)



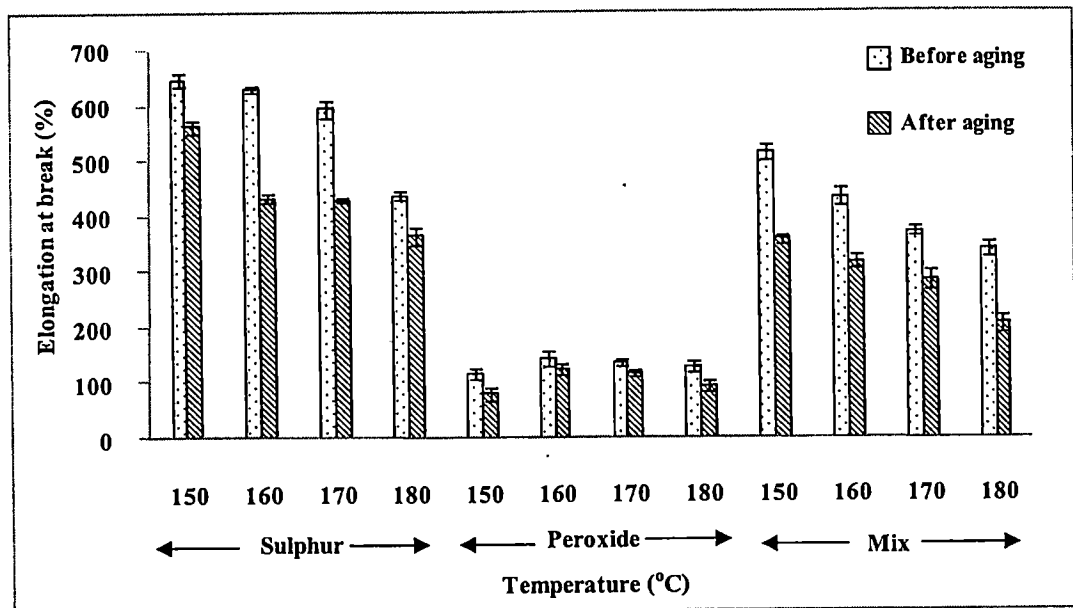
รูปที่ 5.6 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของสูตรยางที่ใช้ระบบและอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่างๆ ทั้งก่อนและ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ข) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 5.7 ความต้านทานต่อแรงดึงของสูตรยางที่ใช้ระบบและอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่างๆ ทั้งก่อนและ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ก) ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)



รูปที่ 5.8 ความสามารถในการยืดจนขาดของสูตรยางที่ใช้ระบบและอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่างๆทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันจะมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% สูงกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสมตามลำดับ หลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางที่วัลคาไนซ์ทุกระบบมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในขณะบ่มแรง เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น โมเลกุลยางมีพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้วัลคาไนซ์จาก 150 °C เป็น 160 °C, 170 °C และ 180 °C จะเห็นว่าระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและระบบกำมะถันผสมเปอร์ออกไซด์ ในช่วงแรกที่วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ 100% มอดูลัสจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และ 100% มอดูลัสจะมีค่าลดลงในช่วงหลังที่วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากส่วนของยางธรรมชาติในยางเบลนด์เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อนทำให้พันธะที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดแตกออก ค่ามอดูลัสของยางจึงลดต่ำลง ส่วนระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ จะมีค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นทุกอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ เนื่องจากยางมีการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา

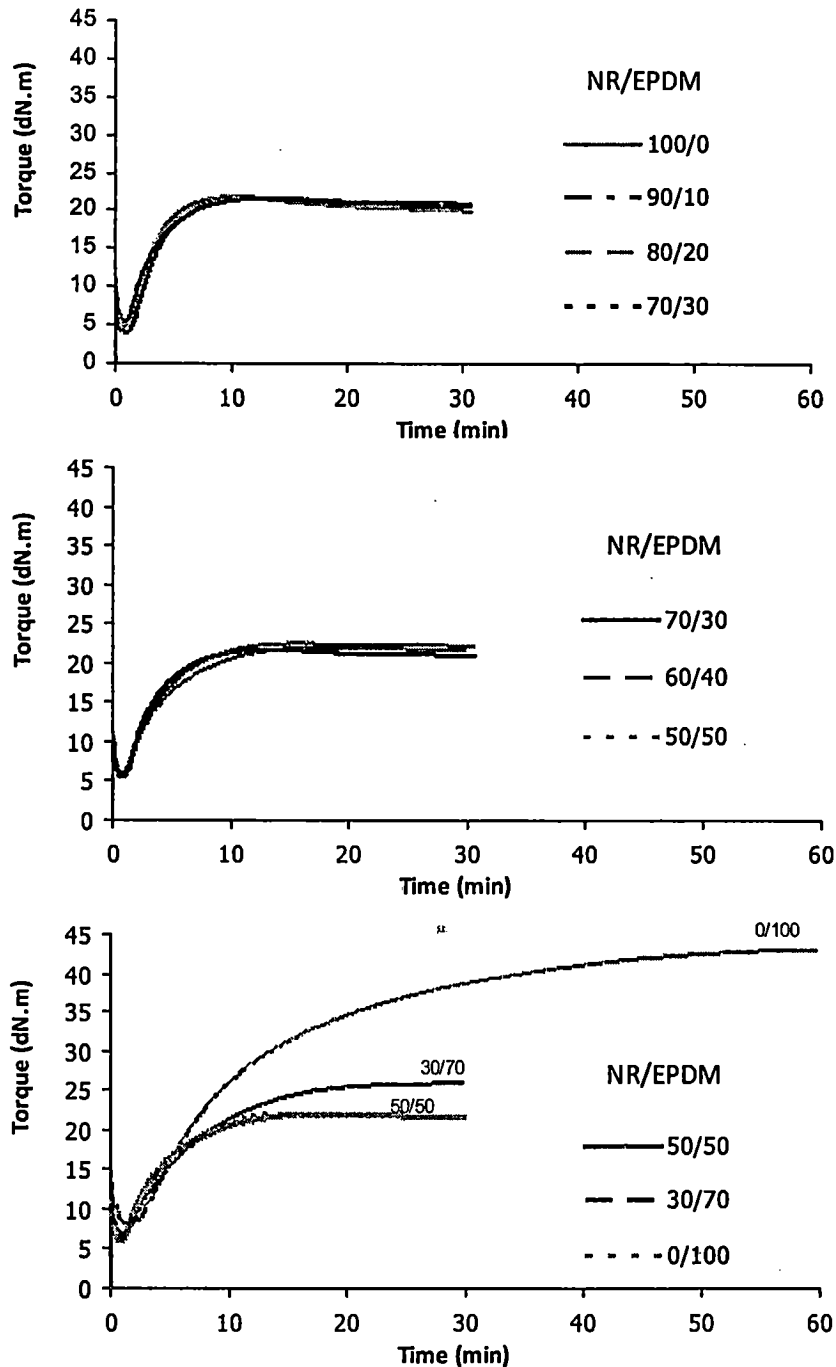
จากรูปที่ 5.7-5.8 จะเห็นว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันจะมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดที่ดีกว่ายางที่ วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อม โยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ในระบบที่วัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ซึ่งใช้พลังงาน 351 kJ/mol จะเกิดได้ยากกว่าการเกิดพันธะเชื่อม โยงแบบมอนอซัลไฟด์ (C-S-C), ไดซัลไฟด์ (C-S-S-C) และพอลิซัลไฟด์ (C-S_x-C, x = 3- 8) ในระบบที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันซึ่งใช้พลังงาน 285, 267 และ 267 kJ/mol ตามลำดับ อีกทั้งการเชื่อม โยงพันธะแบบพอลิซัลไฟด์สามารถแตกออกภายใต้การกระทำเชิงกลและสามารถรวมตัวเกิดเป็นพันธะเชื่อม โยงใหม่ ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าการเชื่อม โยงพันธะแบบคาร์บอน-คาร์บอน (ตุลยพงษ์, 2551) และการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของยางเพื่อที่จะเกิดการเชื่อม โยงระหว่างโมเลกุลยางในระบบเปอร์ออกไซด์ของยางต่างชนิดกันก็จะมีคามยากง่ายแตกต่างกันตามลักษณะของโครงสร้างของยางแต่ละชนิด (พรพรรณ, 2528) ทำให้ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดดีที่สุด รองลงมาคือระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกระบบกำมะถันวัลคาไนซ์ยางเบลนด์ในหัวข้อต่อไป

5.4 การแปรอัตราส่วนการผสมระหว่างยาง NR และ EPDM

สมบัติยางเบลดระหว่าง NR/EPDM ที่แปรสัดส่วน 90/10 ถึง 30/70 และมีสูตรยาง NR และ EPDM ในส่วนผสมของสารเคมีเหมือนกันเพื่อใช้เป็นสูตรอ้างอิง ซึ่งส่วนผสมยางและสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์และสมบัติของยางวัลคาไนซ์มีดังนี้

5.4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์เบลดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ตรวจสอบด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer 2000 ที่อุณหภูมิ 150 °C ได้รับความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (ทอร์ค) กับเวลา ดังรูปที่ 5.9

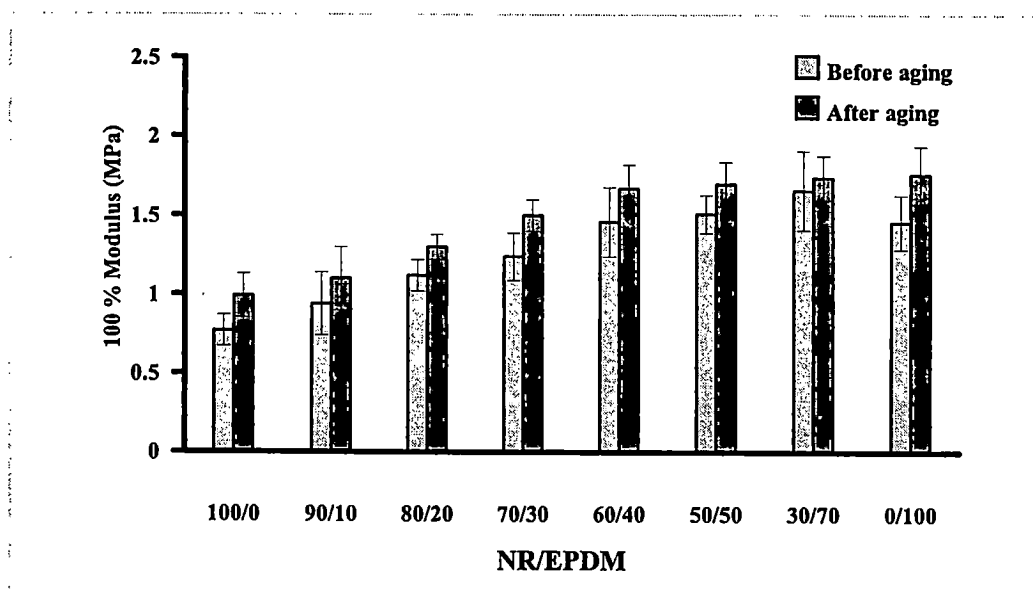


รูปที่ 5.9 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ของยางคอมปาวด์เบลดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จะส่งผลให้ เวลาสก็อตและทอร์คสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง EPDM มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลอยู่น้อยมากและไม่มีควมว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในยางเบลนค์ช้าลงเมื่อสัดส่วนของยาง EPDM เพิ่มขึ้น (บุญธรรม, 2535) ส่วนค่าทอร์คสูงสุดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยาง EPDM เช่นกัน เนื่องจากยาง EPDM เกรด 7001 ที่ใช้มีปริมาณของเอทิลีนสูงถึง 73% ทำให้ยางเบลนค์มีความแข็ง ค่าทอร์คจึงสูงขึ้น ส่วนลักษณะการวัลคาไนซ์ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จะส่งผลให้เกิดการ Reversion ลดลง และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ในระดับหนึ่ง ลักษณะการวัลคาไนซ์จะเป็นแบบ Plateau และเป็นแบบ Marching ในที่สุด เนื่องจากยาง EPDM เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ช้า

5.4.2 สมบัติเชิงกลยางวัลคาไนซ์

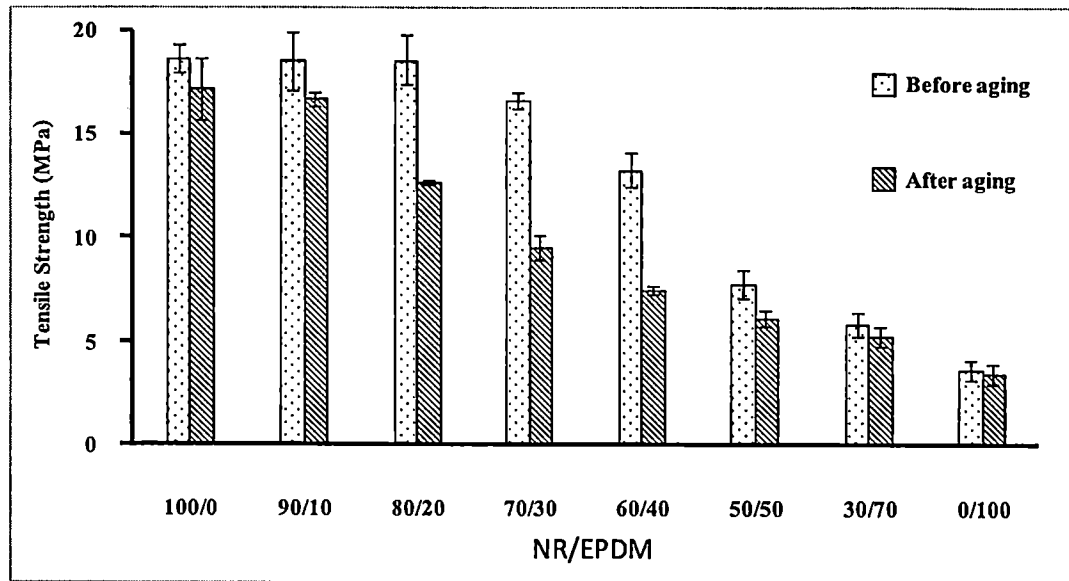
ก) มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (100% Modulus)



รูปที่ 5.10 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

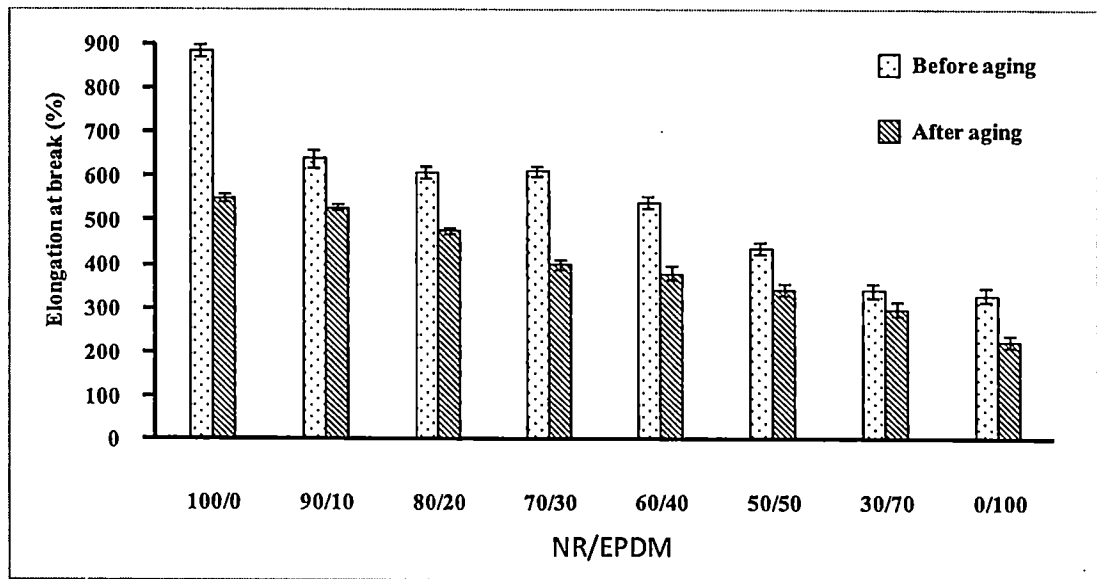
จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่ายางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ส่งผลให้ 100% มอดูลัสมีค่าค่อยเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ EPDM ทำนองเดียวกันหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า 100% มอดูลัสมีค่าสูงกว่าก่อนบ่มแรง เนื่องจากในช่วงที่บ่มแรงยาง ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้อีก โดยส่วนของยาง EPDM ซึ่งเป็นยางที่มีปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่ช้ากว่า (ดังรูปที่ 5.9) มีลักษณะการวัลคาไนซ์เป็นแบบ Marching เมื่อทำการบ่มแรงยางจึงทำให้ระดับของการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นอีก ส่งผลให้ค่า มอดูลัสของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ข) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 5.11 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ค) ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)



รูปที่ 5.12 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.11 และ 5.12 จะเห็นว่ายางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง เนื่องจากยาง EPDM เป็นยางที่มีสมบัติเด่นในเรื่องการทนทานต่อสภาพแวดล้อมแต่มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีเพราะพันธะคู่โครงสร้างโมเลกุลน้อยทำให้มีจุดที่จะเกิดพันธะ

เชื่อมโยงได้น้อย สายโซ่โมเลกุลสั้นทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อย และความเป็นระเบียบในโครงสร้างโมเลกุลต่ำ ทำให้ขณะที่ยางถูกดึงหรือยืดออกไม่สามารถดกผลึกได้เหมือนยาง NR วัลคาไนซ์ (บุญธรรม, 2535) ส่วนการเปลี่ยนแปลงหลังจากการบ่มแรงจะเห็นว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลงมากหลังการบ่มแรง ซึ่งเป็นผลมาจากทั้งในส่วนของยาง NR ที่มีสมบัติด้านการทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่ดี และจากความไม่เข้ากันของยาง NR กับยาง EPDM โดยยาง NR มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลอยู่มากทำให้ไม่ทนทานต่อสภาวะบ่มแรง ส่วนยาง EPDM มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลอยู่น้อยทำให้ทนทานต่อสภาวะบ่มแรง

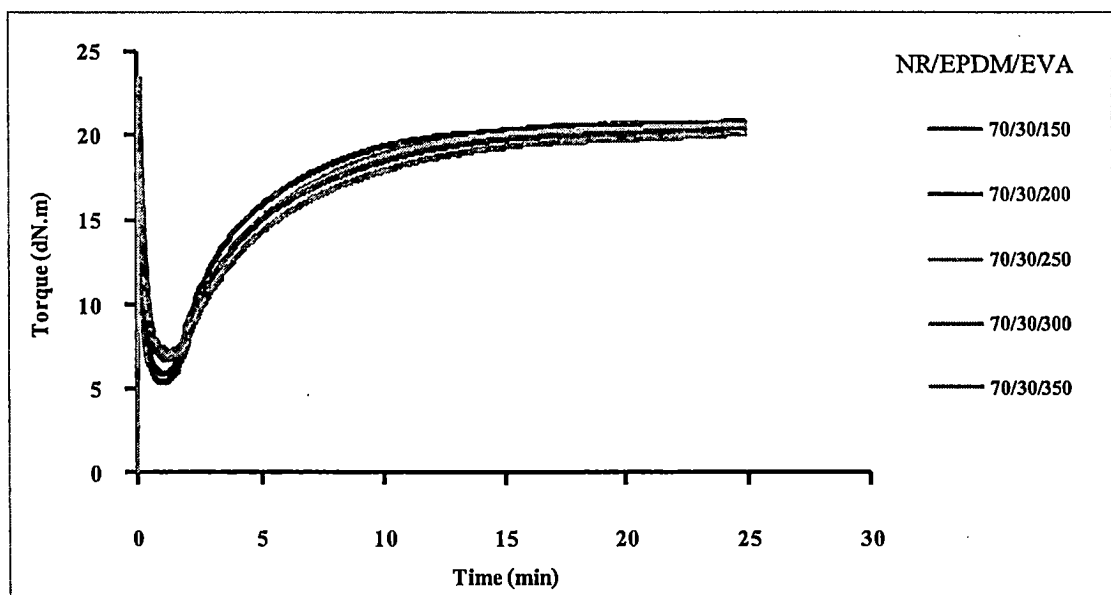
ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีสมบัติคุณสมบัติต่างๆ เพิ่มขึ้น สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางค่อยๆ ลดลงตามปริมาณการเบลนดของยาง EPDM ดังนั้นจึงเลือกการเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 เพื่อใช้ศึกษาการใส่เศษยาง EVA ปริมาณต่างๆ เป็นสารตัวเติมต่อไป

5.5 การแปรส่วนผสมเศษยาง EVA ในยาง NR และ EPDM

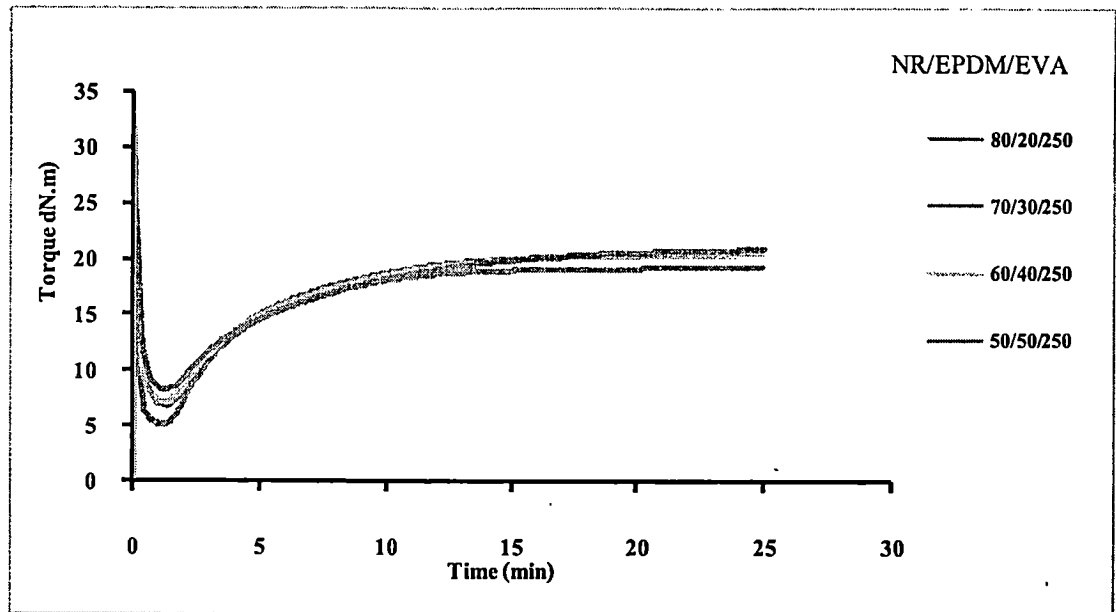
ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 มีการใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมปริมาณต่างๆ คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 phr โดยมีส่วนผสมของยางและสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.4 สมบัติยางคอมปาวด์และยางวัลคาไนซ์ มีดังนี้

5.5.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM โดยใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer 2000 ที่อุณหภูมิ 150°C ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (ทอร์ค) กับเวลา แสดงดังในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

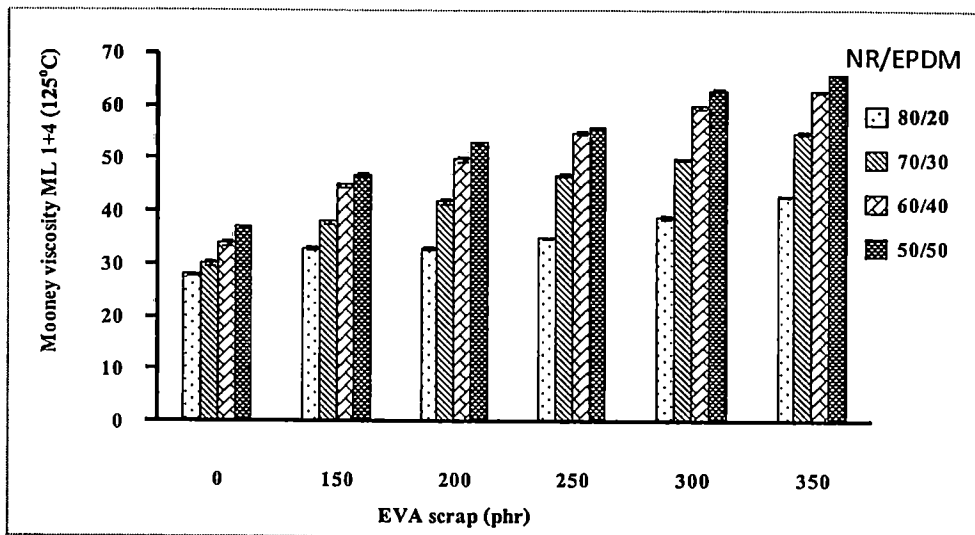


รูปที่ 5.14 ลักษณะการวัดคาบในของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม ในปริมาณ 250 phr

จากรูปที่ 5.13 ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเศษยาง EVA (150, 200, 250, 300 และ 350 phr) จะส่งผลให้อัตราการวัดคาบในช้าลง ทอร์กสูงสุด (M_H) มีค่าลดลง และทอร์กต่ำสุด (M_L) มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ismail *et al* (2002) สำหรับเศษยาง EVA ที่ใช้เป็นสารตัวเติมก่อนนำมารีดเป็นแผ่นและย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ มีลักษณะเป็นโฟมที่มีรูพรุน และหลังจากการรีดแล้วอาจจะมีรูพรุนหลงเหลืออยู่ จึงสามารถจะดูดซับสารตัวเร่งและสารเคมีเข้าไปบางส่วน ทำให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดช้าลง ส่วนการที่ค่าทอร์กต่ำสุดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเศษยาง EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่เข้าไปในยาง NR/EPDM จะกระจายในเฟสของยาง และแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง เศษยาง EVA มีความนิ่มกว่ายาง NR/EPDM และแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางเบลนด ดังนั้นความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงระหว่างโซ่โมเลกุลยางที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุดมีค่าต่ำลง

รูปที่ 5.14 ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ใส่ปริมาณเศษยาง EVA เท่ากัน (250 phr) แปรสัดส่วนปริมาณของ EPDM พบว่า สัดส่วนของ EPDM ปริมาณสูง จะส่งผลให้ค่าทอร์กต่ำสุด (M_L) และทอร์กสูงสุด (M_H) มีค่าสูงกว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่มีสัดส่วนของ EPDM ต่ำ เนื่องจากยาง EPDM ที่ใช้เป็นเกรด 7001 มีความหนืดสูงสูงกว่า NR ดังนั้นค่าทอร์กจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของยาง EPDM ที่เพิ่มสูงขึ้น

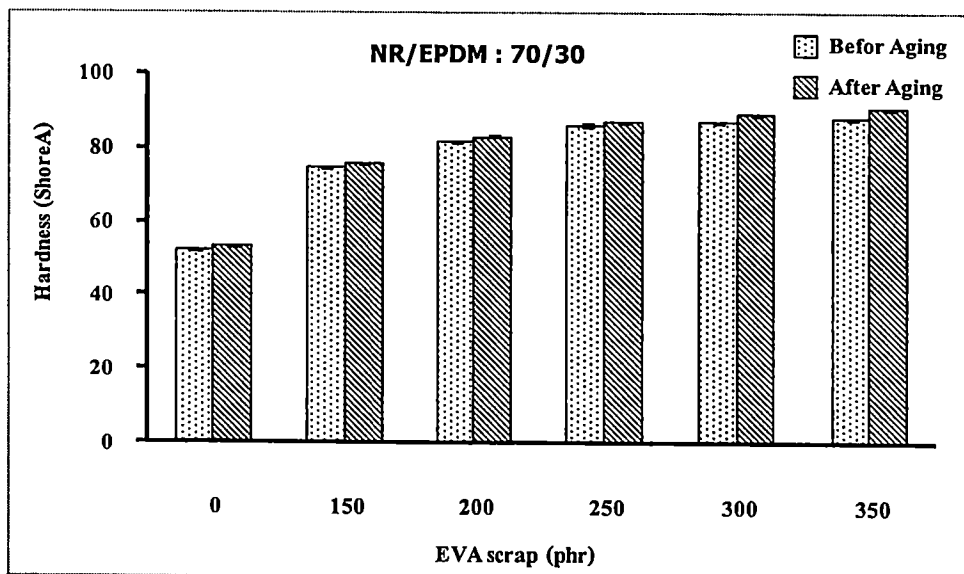
5.5.2 ความหนืด (Mooney viscosity)



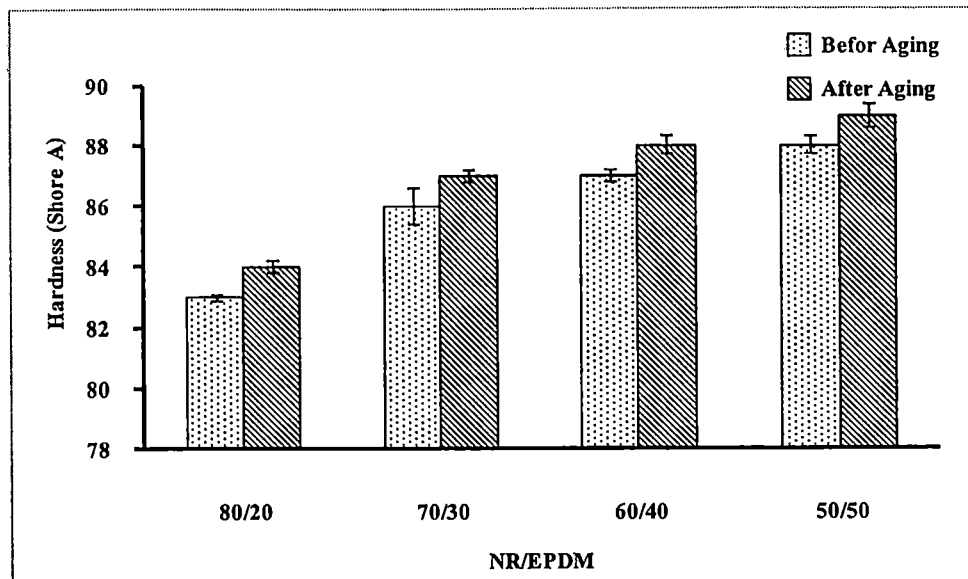
รูปที่ 5.15 ความหนืดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่า ความหนืดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยาง EPDM ที่ค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง EPDM ที่ใช้แข็งกว่ายาง NR การใส่เศษยาง EVA ปริมาณเพิ่มขึ้นในยางเบลนค์ พบว่า ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยาง EPDM เช่นเดียวกัน เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่ในยางเบลนค์ได้ผ่านการทำให้เกิดการวัลคาไนซ์แล้ว แม้จะนำมาบดใหม่แต่ยังมีพันธะเชื่อมโยงบางส่วนอยู่ และเกิดการเกาะกลุ่มกันในยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM (Ismail *et al*, 2002) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางไหลได้ยากขึ้น ค่าความหนืดจึงเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเศษยาง EVA ที่เพิ่มขึ้นด้วย

5.5.3 ความแข็ง (Hardness)



รูปที่ 5.16 ความแข็งของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 ใส่ EVA ปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

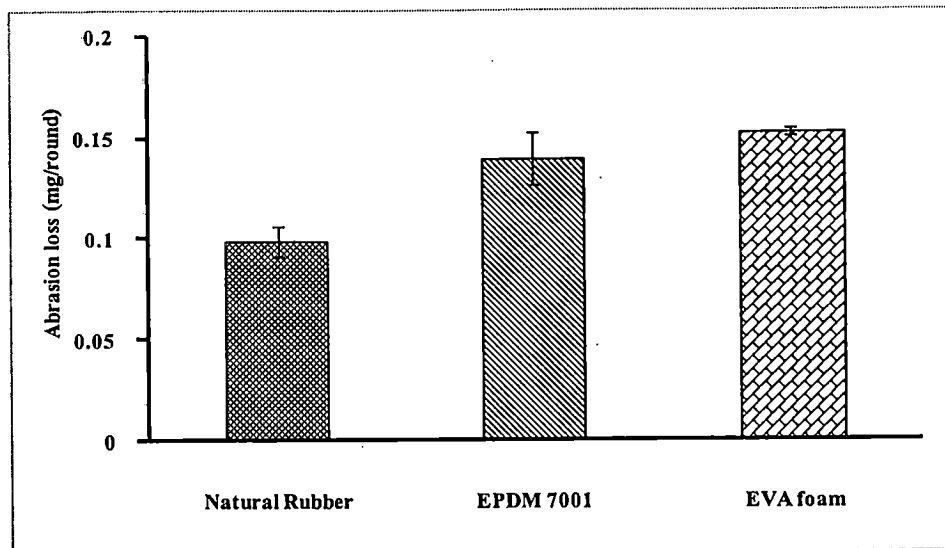


รูปที่ 5.17 ความแข็งของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 250 phr ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.16-5.17 จะเห็นว่า ความแข็งของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาณของยาง EPDM ที่ค่าเพิ่มขึ้น การใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ (0, 150, 200, 250, 300 และ 350 phr) พบว่าความแข็งของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของเศษยาง EVA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใช้ผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้วจึงมีความแข็งในระดับหนึ่ง เมื่อนำมาใส่เป็นสารตัวเติมในยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM จึงทำให้ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อบ่มแรงยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าความแข็งของยางมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากในช่วงที่บ่มแรงยาง พันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นน้อย ความแข็งของยางวัลคาไนซ์จึงเพิ่มขึ้นน้อยด้วย และสมบัติของยาง EPDM มีความเสถียรเชิงความร้อนดี มีปริมาณพันธะคู่ต่ำ ทำให้สมบัติความแข็งหลังบ่มแรงเปลี่ยนแปลงน้อย

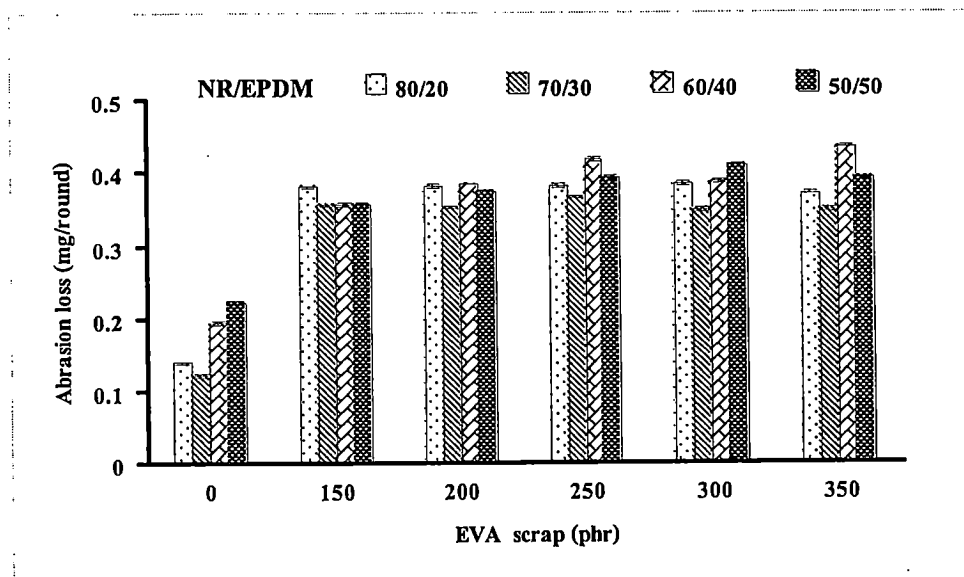
5.5.4 การสึกหรอ (Abrasion loss)

การสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ NR, EPDM และแผ่น EVA foam ทดสอบด้วยเครื่องเทเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ส่วนการเบลนดยาง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ พบว่าการสึกหรอ จะเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.18 ความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติและยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam

จากรูปที่ 5.18 จะเห็นว่ายางวัลคาไนซ์ NR , EPDM และ EVA foam มีการสึกหรอ เท่ากับ 0.099 ± 0.007 , 0.140 ± 0.013 และ 0.153 ± 0.002 กรัมต่อรอบ ตามลำดับ ความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง NR จะดีกว่ายาง EPDM และแผ่น EVA foam เนื่องจากยาง NR มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่ายาง EPDM และแผ่น EVA foam ทำให้การเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีมากกว่า นอกจากนี้ยาง NR มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างมากทำให้มีจุดเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยกัมมันต์มากด้วย ดังนั้นเมื่อผิวยางถูกการขัดถูทำให้โมเลกุลยางหลุดออกจากกันได้ยากกว่ายาง EPDM และแผ่น EVA foam



รูปที่ 5.19 การสึกหรอของยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

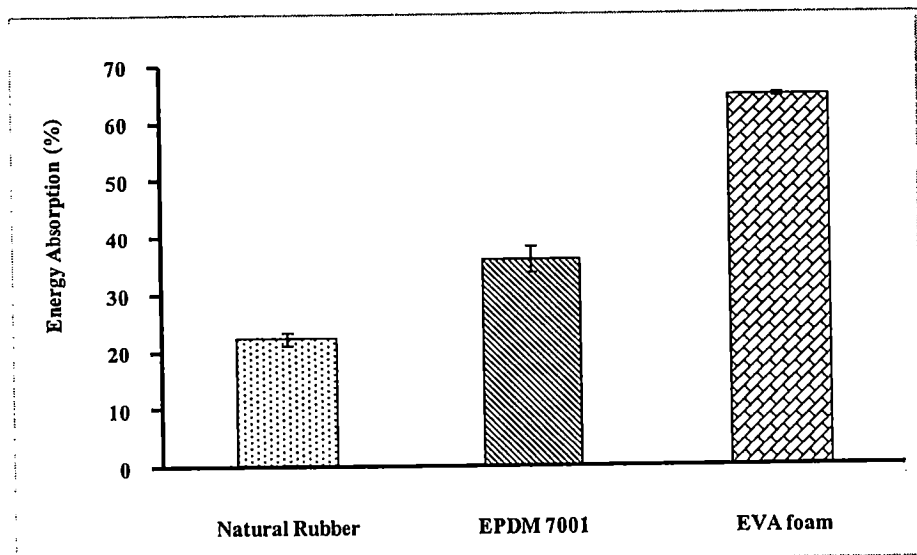
จากรูปที่ 5.19 จะเห็นว่า การใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM (80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50) การสึกหรอของยางจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากยางเบลนด์ที่ไม่ใส่เศษยาง EVA เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่เข้า

ไปจะกระจายอยู่ในเฟสยาง NR และยาง EPDM ทำให้การเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางทั้งสองลดลง เมื่อผิวยางถูกการขัดถูทำให้โมเลกุลยางเบสลดหลุดออกจากกันได้ง่ายขึ้น ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ทุกสัดส่วนเมื่อใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมจึงมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น เปรียบเทียบยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม จะเห็นว่าปริมาณของเศษยาง EVA เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การสึกหรอของยางเบลนดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถใส่เศษยาง EVA ปริมาณสูงลงไปยางเบลนดถึง 350 phr โดยการสึกหรอของยางมีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก

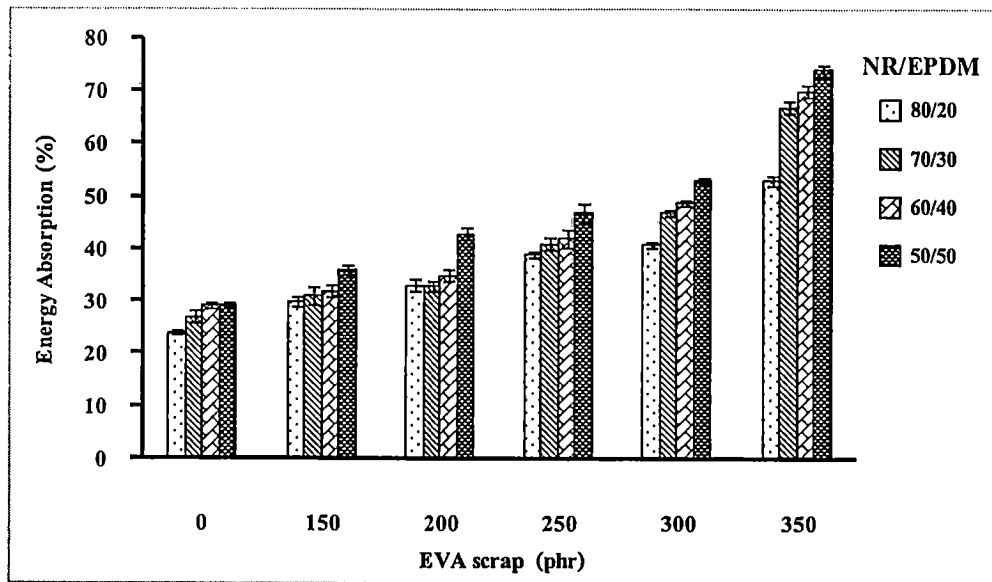
จากรูปที่ 5.18-5.19 จะเห็นว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ทุกสัดส่วนมีการสึกหรอสูงกว่ายาง NR วัลคาไนซ์และยาง EPDM วัลคาไนซ์ เนื่องจากยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีความเข้ากันค่อนข้างยาก อันเป็นผลจากโครงสร้างโมเลกุลของยาง ดังนั้นโมเลกุลยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM จึงหลุดออกได้ง่ายกว่ายาง NR วัลคาไนซ์ และยาง EPDM วัลคาไนซ์ และเมื่อใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมจะส่งผลให้ความต้านทานต่อการสึกหรอลดลงเมื่อเทียบกับแผ่น EVA foam เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่เข้าไปมีลักษณะเป็นผงซึ่งจะไปกระจายอยู่ในเฟสยาง NR และยาง EPDM ทำให้การเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางทั้งสองลดลง นอกจากนี้ ยาง NR และ EPDM มีความสามารถผสมเข้ากันได้ไม่ดี จึงส่งผลให้ผิวยางที่ถูกขัดถูตรงผิวหลุดออกจากกันได้ง่าย และยางหลุดออกง่ายกว่าแผ่นยางวัลคาไนซ์ชนิด EVA foam ที่มีลักษณะเป็นแผ่น เนื่องจากยาง EVA foam มีสายโซ่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกัน มีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีกว่า

5.5.5 การดูดกลืนพลังงาน (Energy Absorption)

ยางวัลคาไนซ์ NR, EPDM และ EVA foam มีความสามารถดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 5.20 ส่วนยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ พบว่าการดูดกลืนพลังงานจะเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.20 การดูดกลืนพลังงานของยางธรรมชาติและยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam



รูปที่ 5.21 การดูดกลืนพลังงานของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

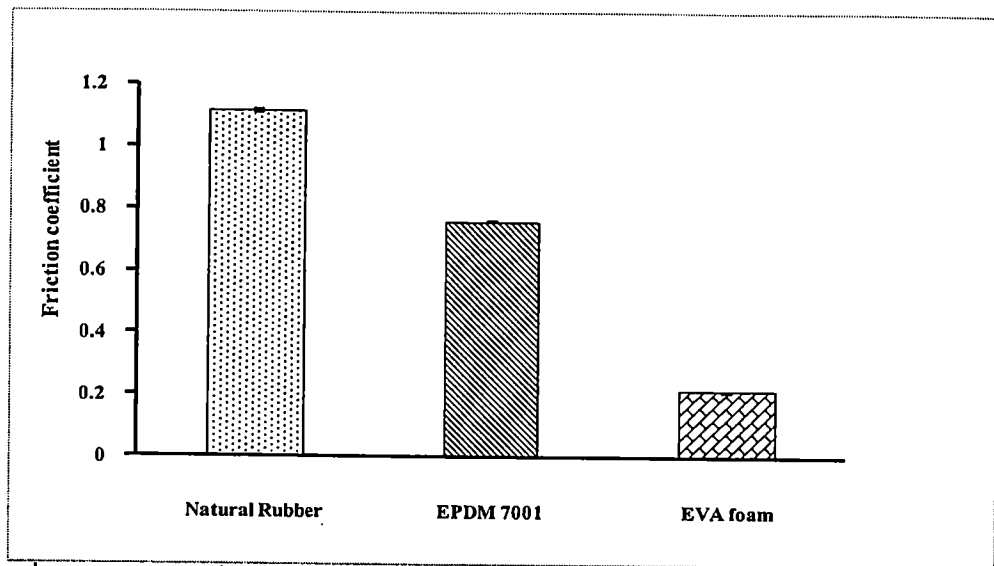
จากรูปที่ 5.20 จะเห็นว่าการดูดกลืนพลังงานของยางวัลคาไนซ์ NR ต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ชนิด EPDM และแผ่นยางวัลคาไนซ์ EVA foam เนื่องจากยาง NR มีสมบัติความยืดหยุ่นสูง และในโครงสร้างโมเลกุลของยาง NR มีพันธะคู่อยู่ ทำให้แรงกระทำที่มากกระทำต่อสายโซ่โมเลกุลยางสามารถบิดงอหรือเคลื่อนไหวไปมาได้ง่าย การดูดกลืนพลังงานไว้ในยางจึงมีค่าน้อย และมีค่าน้อยกว่ายางวัลคาไนซ์ EPDM และแผ่นยาง EVA foam ซึ่งแผ่นยาง EVA foam มีรูพรุนอยู่ภายในทำให้สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากที่สุด

จากรูปที่ 5.21 จะเห็นว่าการดูดกลืนพลังงานของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม 0, 150, 200, 250, 300 และ 350 phr พบว่าการดูดกลืนพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเศษยาง EVA ที่เพิ่มขึ้น และยางเบลนค์ที่ใส่เศษยาง EVA จะมีค่าการดูดกลืนพลังงานสูงกว่ายางเบลนค์ที่ไม่ใส่เศษยาง EVA สำหรับยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม มีค่าการดูดกลืนพลังงานต่ำกว่าแผ่นยาง EVA foam เนื่องจากฟองอากาศที่มีอยู่ในแผ่น EVA foam สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่ายาง NR และยาง EPDM

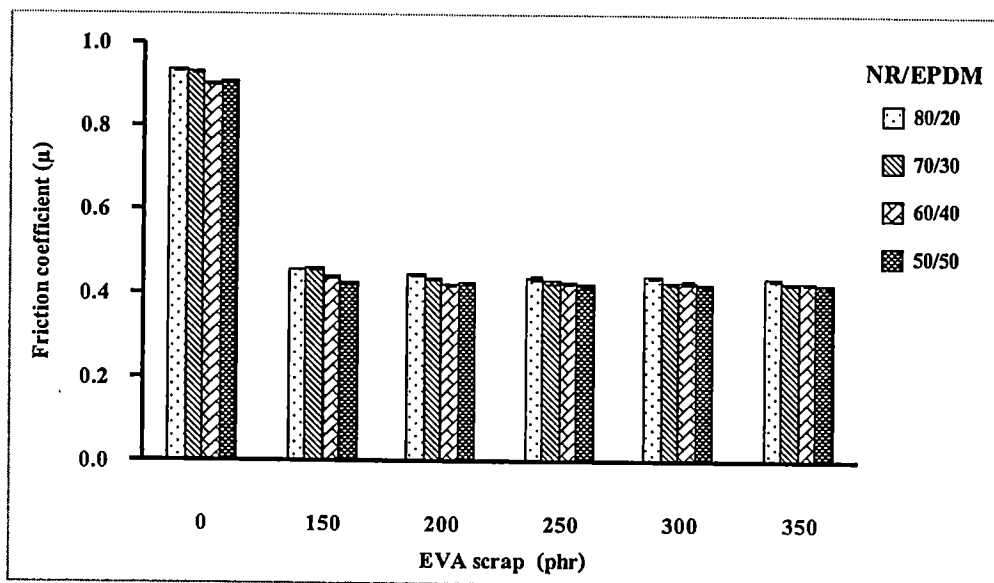
ยางเบลนค์ที่มีสัดส่วนของ NR/EPDM ปริมาณเท่ากัน การเพิ่มปริมาณของเศษยาง EVA ส่งผลให้สมบัติการดูดกลืนพลังงานของยางเบลนค์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่เป็นสารตัวเติมมีการกระจายอยู่ในเฟสยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางขยับตัวได้ยากขึ้น การดูดกลืนพลังงานจึงสูงมากขึ้น ส่วนยางเบลนค์ที่ใส่เศษยาง EVA ปริมาณเท่ากัน และมีสัดส่วนของยาง EPDM เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การดูดกลืนพลังงานของยางเบลนค์มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างของยาง EPDM ที่ใช้มีปริมาณของเอทิลีนสูงถึง 73% ทำให้มีสมบัติของความเป็นเทอร์โมพลาสติกสูง การดูดกลืนพลังงานจึงสูงขึ้นด้วย

5.5.6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient)

ยางวัลคาไนซ์ NR, EPDM และ EVA foam มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ดังรูปที่ 5.22 ยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.22 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางธรรมชาติและยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam

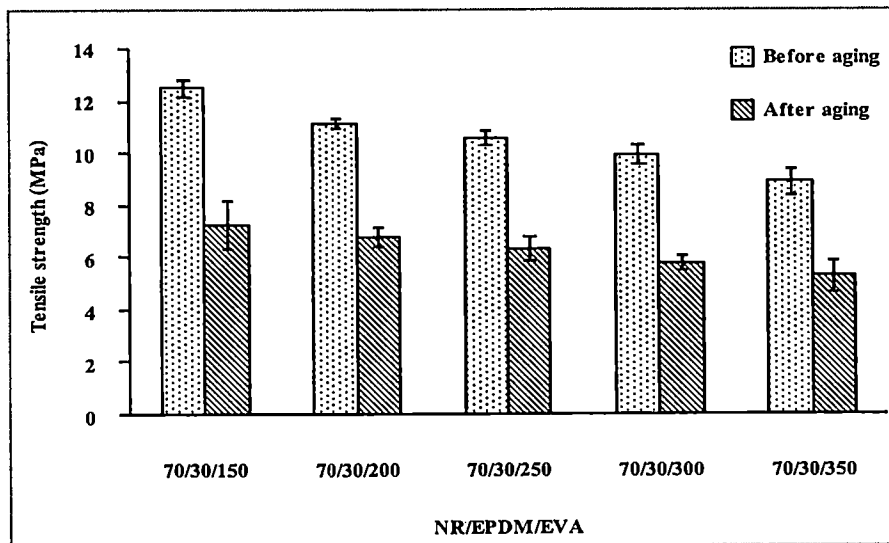


รูปที่ 5.23 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางblendระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

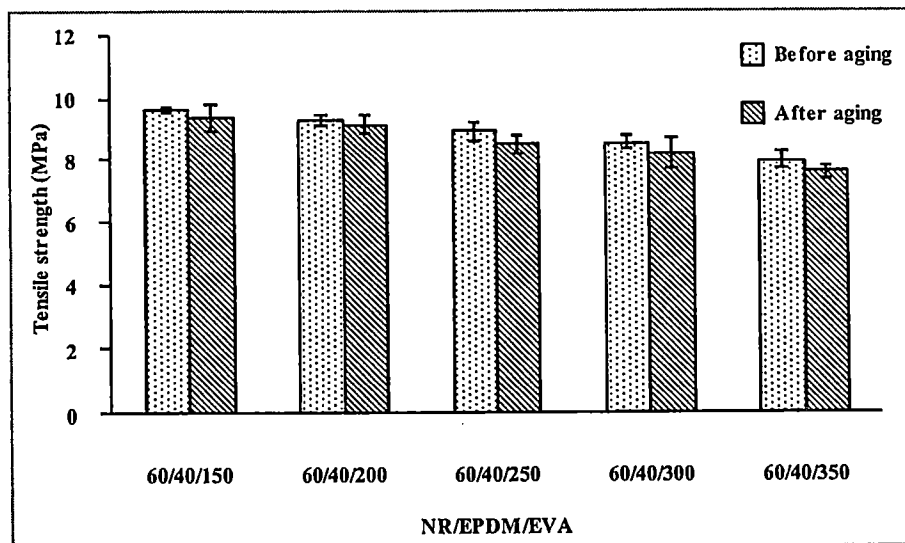
จากรูปที่ 5.22 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยาง NR วัลคาไนซ์มีค่าสูงกว่ายาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam เนื่องจาก ยาง NR มีความสามารถในการยึดติดดี โดยในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ ยาง จะมีแผ่นกระจกสัมผัสกับผิวแผ่นยางและสามารถทำให้เคลื่อนที่ไปมาได้ ซึ่งแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ยางบนแผ่น กระจกต้องมากกว่าแรงเสียดทานของผิวยาง แผ่นกระจกจึงจะเคลื่อนที่ได้ โดยยาง NR จะมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีเยี่ยม จึง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด รองลงมาคือยาง EPDM วัลคาไนซ์ และแผ่น EVA foam ตามลำดับ สำหรับยาง EPDM โครงสร้างของยาง EPDM มีพลาสติกคือเอทิลีนสูงถึง 73% ทำให้มีสมบัติการยึดติดต่ำกว่ายาง NR ส่วนแผ่น EVA foam มีส่วนที่เป็นฟองอากาศอยู่ ทำให้พื้นที่ผิวยางสัมผัสแผ่นกระจกที่ทดสอบลดน้อยลง แรงที่ใช้ในการ เคลื่อนที่แผ่นกระจกจะน้อยลง ส่งผลในสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแผ่น EVA foam มีค่าต่ำที่สุด

จากรูปที่ 5.23 จะเห็นว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ซึ่งไม่ได้ใส่เศษยาง EVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อนข้างสูงอยู่ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยาง NR และ ยาง EPDM เมื่อใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมปริมาณต่างๆ จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากเศษยาง EVA เป็นเศษแผ่น EVA foam ที่นำมาบดมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ จึงทำให้ยางเบลนด์ที่ใส่เศษยาง EVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงด้วย นอกจากนี้ยางเบลนด์ ที่ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติม มีลักษณะผิวจะขรุขระกว่ายางเบลนด์ที่ไม่ใส่เศษยาง EVA ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างแผ่นกระจกกับผิวยางของยางเบลนด์ที่ใส่เศษยาง EVA น้อยกว่ายางเบลนด์ที่ไม่ใส่เศษยาง EVA สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมปริมาณต่างๆ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ 0.43 ± 0.02

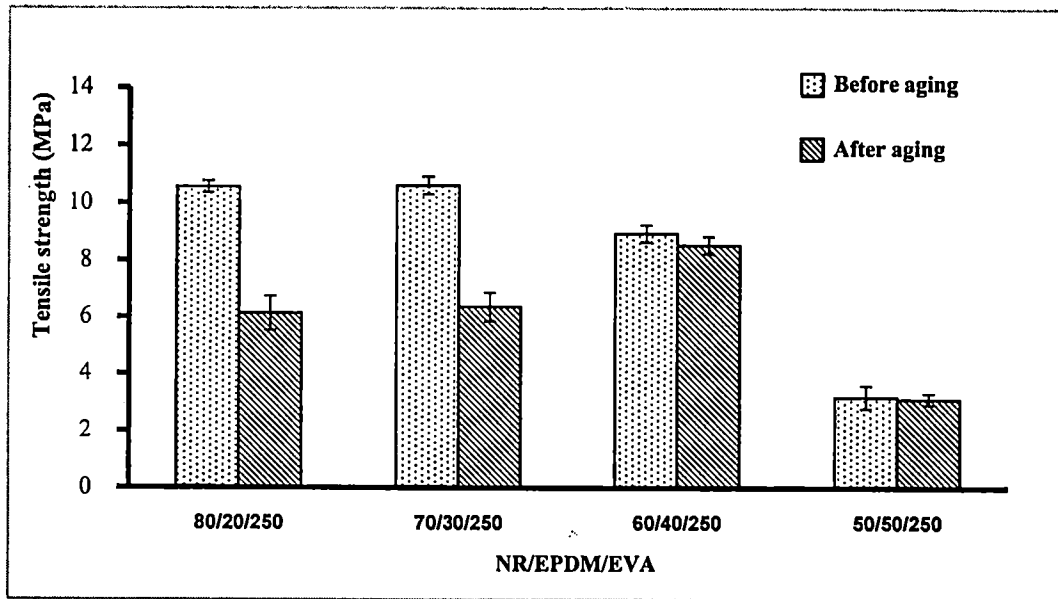
5.5.7 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)



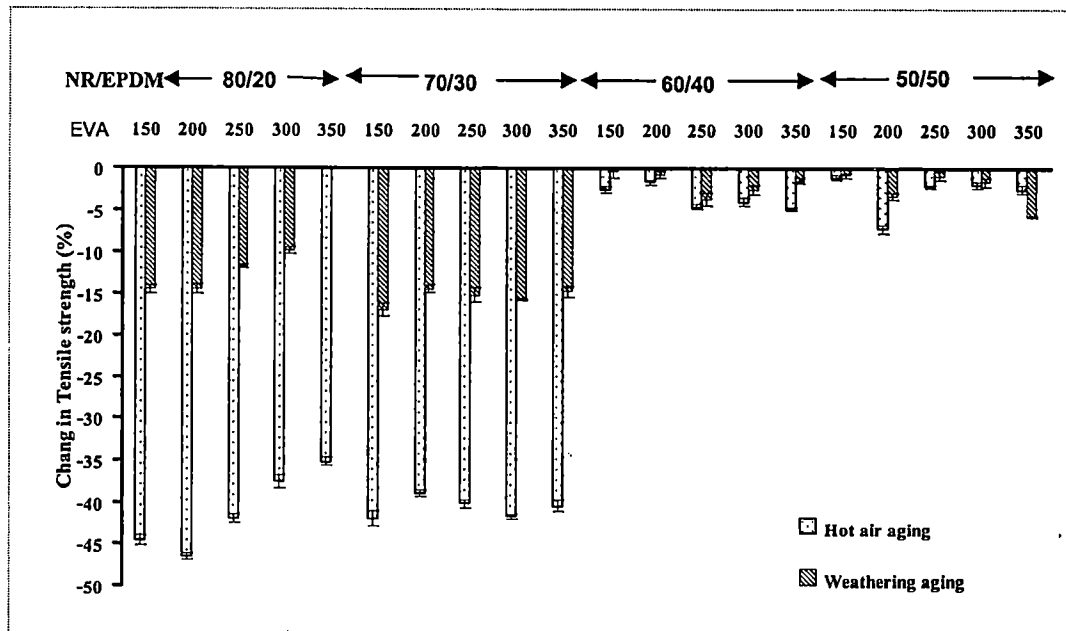
รูปที่ 5.24 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 โดยใช้เศษ ยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.25 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 60/40 โดยใช้เศษ ยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.26 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณ 250 phr ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงหลังของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนเศษยาง EVA ปริมาณ 150-350 phr บ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C 72 ชั่วโมง และความทนต่อสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน

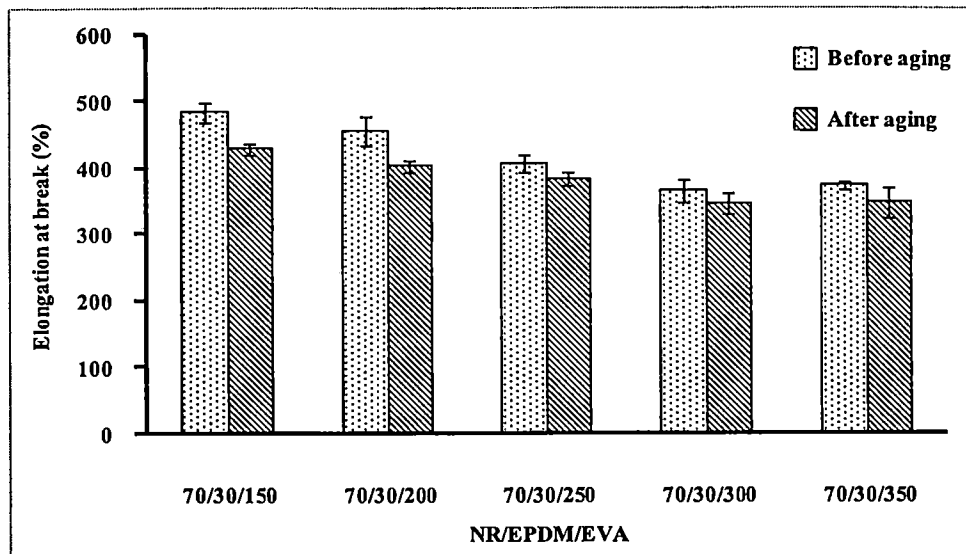
จากรูปที่ 5.24-5.26 จะเห็นว่าการเพิ่มเศษยาง EVA ปริมาณต่างๆ ในยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 60/40 ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่ลงไปยางเบลนดทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกระจายอยู่ในเฟสยาง NR และยาง EPDM ทำให้ความเป็นระเบียบของโครงสร้างโมเลกุลในเฟสยาง NR ซึ่งเป็นส่วนทำให้ยางเบลนดมีสมบัติเชิงกลดี มีความเป็นระเบียบลดลง ส่งผลให้ขณะยืดความสามารถดกผลึกในส่วนของเฟสยาง NR ลดน้อยลง สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนดจึงมีค่าลดลงด้วย

สำหรับยาง EVA มีความเข้ากันได้กับโครงสร้างโมเลกุลยาง EPDM ดีกว่ายาง NR ซึ่งยางวัลคาไนซ์ EPDM ใส่เศษยาง EVA จะมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่หากใส่ยาง EPDM ใส่ปริมาณเศษยาง EVA มากกว่า 200 phr จะมีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดต่ำลง (เสาวนีย์ อัญรัตน์ และวุฒิชัย, 2551) อย่างไรก็ตามการยางเบลนดระหว่าง NR และยาง EPDM ซึ่งมียาง EPDM อยู่ปริมาณน้อย (<30) พบว่าหลังบ่มเร่งยางที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดต่ำลงอย่างมาก ส่วนยางเบลนดที่มีสัดส่วนผสมของยาง EPDM มากกว่า 40 ส่วน สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดต่ำลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ ใส่เศษยาง EVA ปริมาณ 250 phr พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงจะมีการเปลี่ยนแปลงลดต่ำลงทำนองเดียวกัน

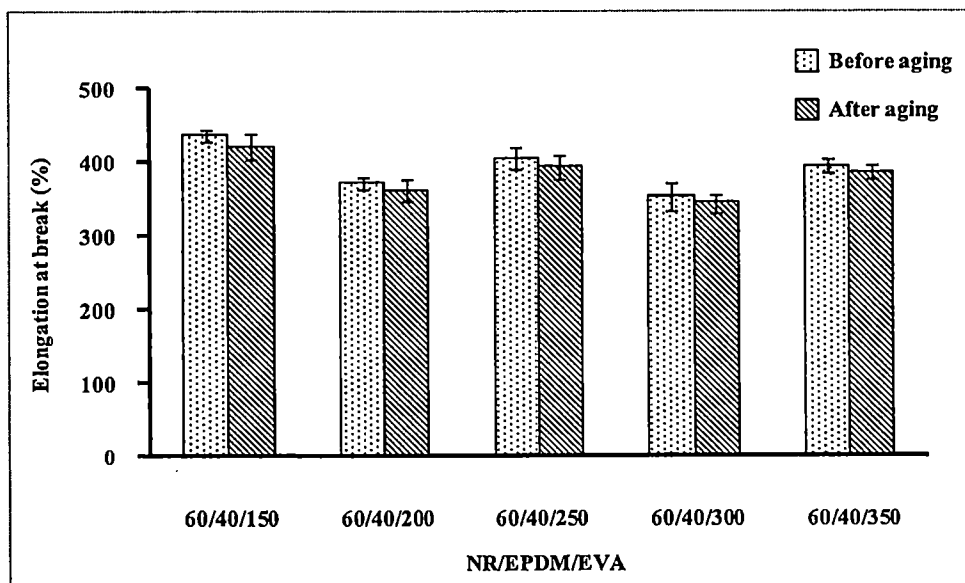
การบ่มเร่งยางที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20 และ 70/30 ซึ่งมีสัดส่วนของยาง EPDM ปริมาณน้อย ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากความไม่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันของยาง NR และ EPDM และในส่วนยาง NR มีพันธะคู่อยู่มากกว่ายาง EPDM จึงมีความทนทานต่อการบ่มเร่งไม่ดี แต่ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ทุกสัดส่วนของ 60/40 ที่ใส่เศษยาง EVA ปริมาณต่างๆ (150-350 phr) ดังรูปที่ 5.25 พบว่าหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากสัดส่วนของยาง EPDM ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ยางเบลนดมีความทนทานต่อการบ่มเร่งดีขึ้น ทำนองเดียวกันยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 50/50 หลังบ่มเร่งในอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะ มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความทนทานต่อแรงดึงลดต่ำลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากรูปที่ 5.27 การบ่มเร่งยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ใส่เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ (150-350 phr) ในอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และในสภาพแวดล้อมของบรรยากาศ ซึ่งวางขึ้นทดสอบที่กลางแจ้งเป็นเวลา 30 วัน พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20 และ 70/30 มีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากยางเบลนดทั้งสองสัดส่วนมีส่วนของยาง NR ปริมาณมากกว่ายาง EPDM ซึ่งในส่วนยาง NR มีสมบัติการทนทานต่อการบ่มเร่งในอากาศร้อนและการทนทานต่อสภาพแวดล้อมไม่ดี จึงมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงค่อนข้างมาก สำหรับสมบัติความทนทานต่อดินฟ้าอากาศของยาง ซึ่งวางขึ้นทดสอบในสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน จะมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงลดลงน้อยกว่าการบ่มเร่งยางในอากาศร้อน เนื่องจากพันธะคู่ในส่วนยาง NR จะสามารถถูกออกซิเจนและโอโซนในอากาศร้อนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าสภาวะปกติในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิของบรรยากาศ สำหรับยางเบลนดที่สัดส่วน NR/EPDM เท่ากับ 60/40 และ 50/50 จะมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้นทั้งในภาวะบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และภายใต้สภาวะแวดล้อมของบรรยากาศ เนื่องจากสัดส่วนของยาง EPDM ที่มีปริมาณมากขึ้น และยาง EPDM มีสมบัติความทนทานต่อดินฟ้าอากาศดี

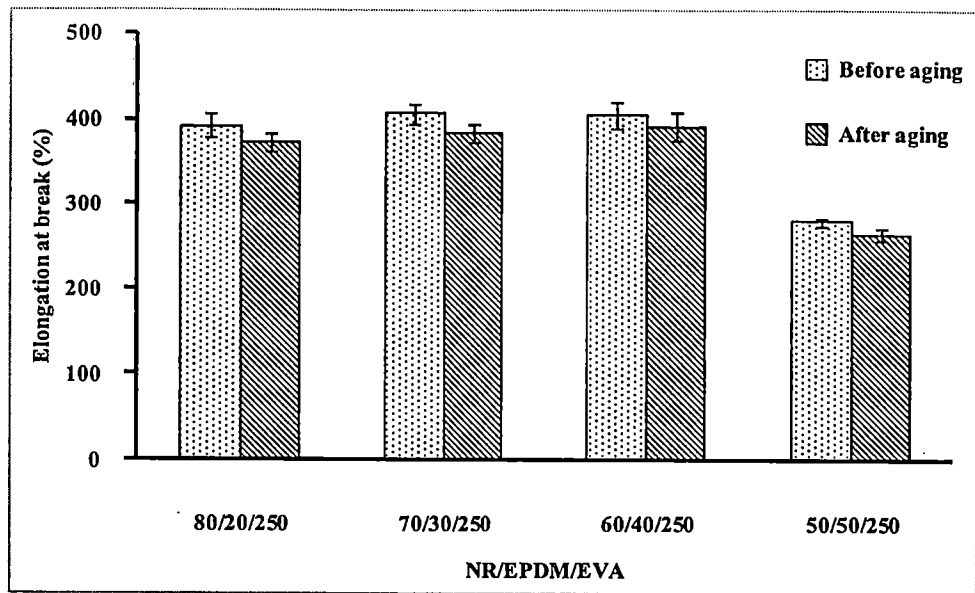
5.5.8 ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)



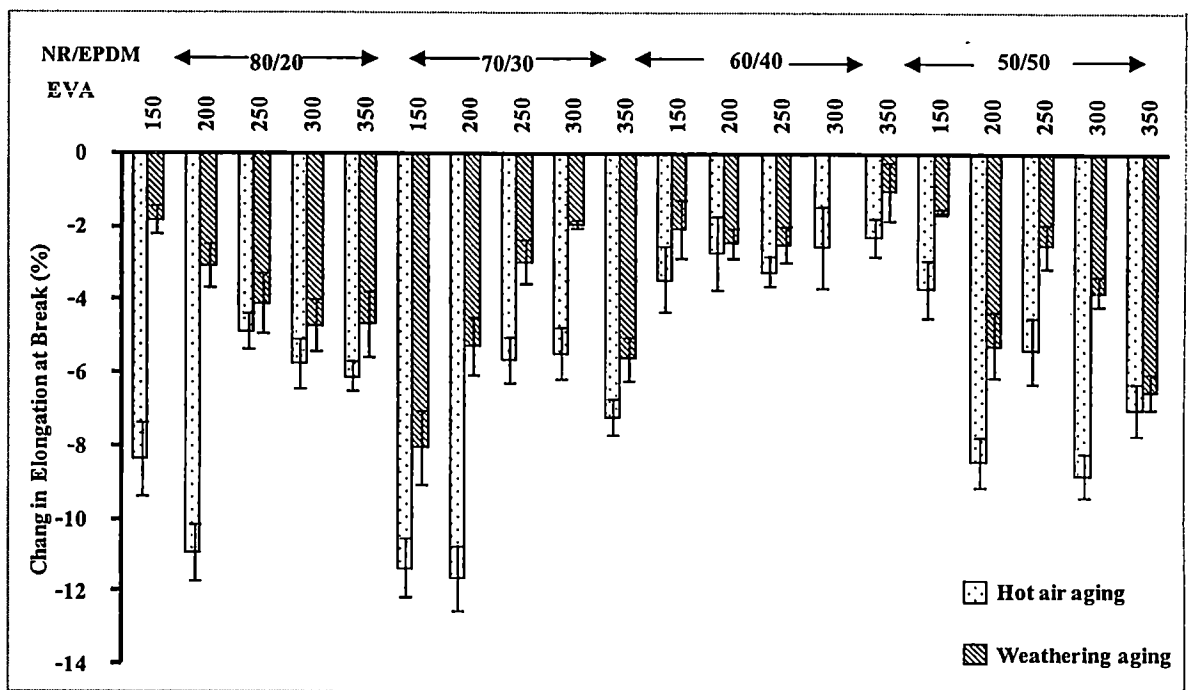
รูปที่ 5.28 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.29 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 60/40 โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆ ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.30 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA ใน ปริมาณ 250 phr ทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



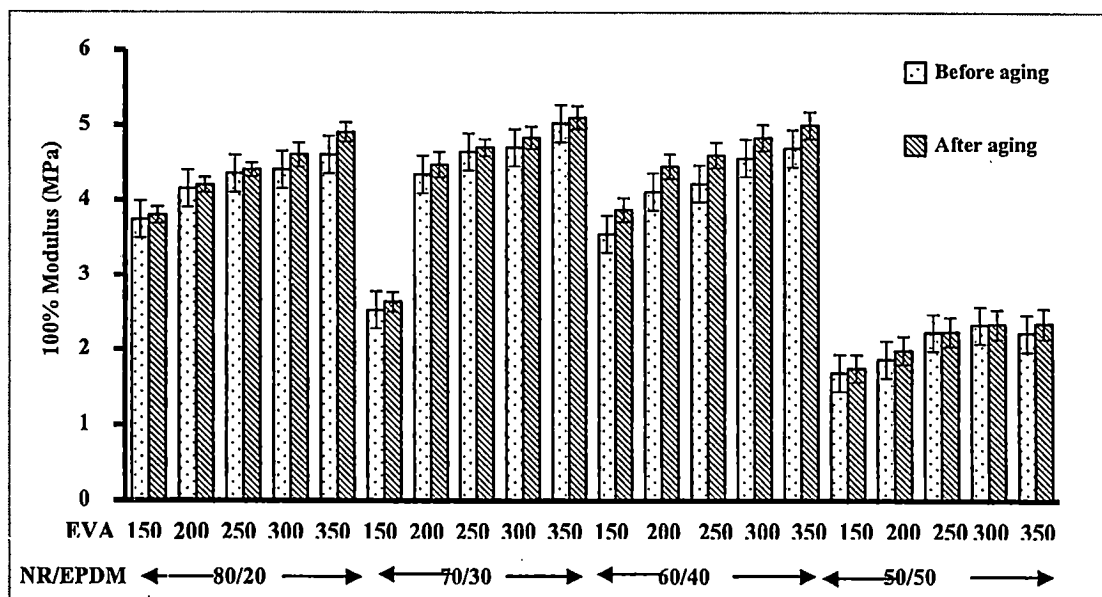
รูปที่ 5.31 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM สัดส่วนต่างๆ ใส่เศษยาง EVA ปริมาณ ต่างๆ บ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงและหลังทดสอบทนทานต่อสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน

จากรูปที่ 5.28-5.30 จะเห็นว่าความสามารถในการยึดของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 เมื่อเพิ่มปริมาณของเศษยาง EVA ความสามารถในการยึดจะมีค่าลดลง เนื่องจากเศษยาง EVA ที่ใส่ลงไปยางเบลนดจะกระจายในเฟสยาง จะขัดขวางการเกิดจุดเชื่อมโยระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ในส่วนของยาง NR ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ยางเบลนดมีสมบัติเชิงกลดี จะเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้ในขณะที่ยึดยางออก สายโซ่โมเลกุลของยางเบลนดจะเกิดการขาดออกจากกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้จะสอดคล้องกับการทดลองของ Phinyocheep (2002) การบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ความสามารถในการยึดของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีค่าลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันของยางทั้งสองชนิดคือยาง NR และ EPDM ซึ่งยาง NR ที่มีอยู่ในส่วนผสมของยางเบลนดมีสมบัติทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ดี เมื่อนำไปบ่มแรงจะถูกออกซิเจนและโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการขาดออกจากกัน

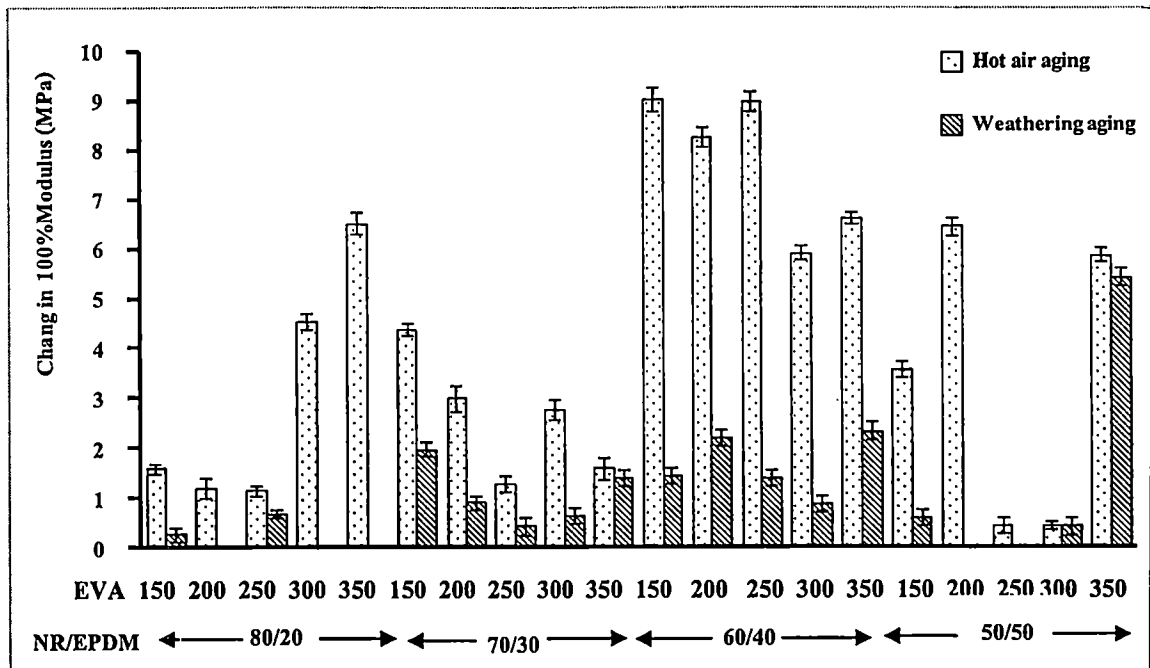
ทำนองเดียวกัน ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมซึ่งวางไว้เป็นเวลา 30 วัน จะมีสมบัติความสามารถในการยึดของยางเบลนดลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงลดน้อยลงเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 5.31 จะเห็นว่าหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของยางเบลนด NR/EPDM ที่สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 แปรปริมาณเศษยาง EVA มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยึดจนขาดลดลงน้อยกว่า 15% โดยหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีสมบัติลดลงมากกว่าความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่วางขึ้นทดสอบในสภาพแวดล้อม เนื่องจากภายใต้สภาวะของการบ่มแรงที่อากาศร้อน พันธะคู่ในส่วนของยาง NR จะสามารถถูกออกซิเจนและโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าสภาวะปกติในบรรยากาศแวดล้อมทั่วไป ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและการใช้งานจึงน้อยกว่า

5.5.9 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (100% Modulus)



รูปที่ 5.32 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้เศษยาง EVA ในปริมาณต่างๆทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.33 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วนและเศษยาง EVA ปริมาณต่างๆ หลัง บ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงและหลังทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 30 วัน

จากรูปที่ 5.32 จะเห็นว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM สัดส่วน 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ใส่เศษยาง EVA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติ 100% มอดูลัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ วัชพงษ์ (2548) เนื่องจาก เศษยาง EVA ที่ใส่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว การใส่เศษ EVA ปริมาณเพิ่มขึ้นในรูปของสารตัวเติม จึงส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สมบัติ 100% มอดูลัสจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้ สมบัติ 100% มอดูลัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากขณะบ่มแรงมีพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM จึง แข็งแรงขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของยาง EPDM ซึ่งมีพันธะคู่ย่อย และไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ การวัลคาไนซ์ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลให้หลังการบ่มแรงสมบัติ 100% มอดูลัสจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

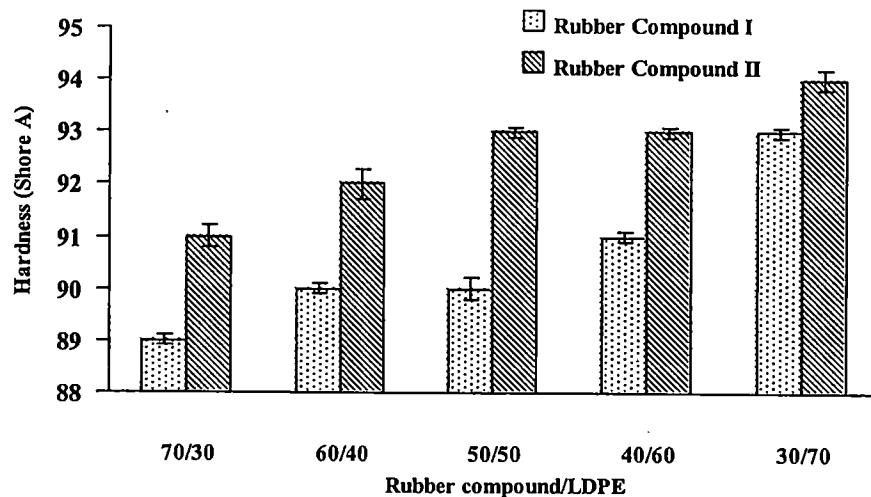
จากรูปที่ 5.33 จะเห็นว่ายางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่ใส่เศษ EVA 150-350 phr หลังบ่มแรงยางที่อากาศร้อน อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สมบัติ 100% มอดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าหลังการวางขึ้นทดสอบยางใน สภาพแวดล้อมบรรยากาศเป็นเวลา 30 วัน เนื่องจากในช่วงที่บ่มแรงในอากาศร้อนยางวัลคาไนซ์มีพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของยางจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับยางที่วางใน บรรยากาศสภาวะแวดล้อมทั่วไป ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นน้อย พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก

จากการศึกษาสมบัติยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM โดยใช้เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ จึง เลือกใช้ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 และ 60/40 ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมปริมาณ 350 phr เพื่อนำมาผสมกับพลาสติกเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LPDE) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อการสึกหรอและ การดัดกลับพลังงานอยู่ในช่วงที่ดี และศึกษาสมบัติต่อไป

5.6 การผสมยางคอมปาวด์ร่วมกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ยางเบลนดระหว่าง NR/EPDM ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมปริมาณ 350 phr ใช้สัดส่วนผสมระหว่าง NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 (Rubber compound I) และ 60/40 (Rubber compound II) ผสมร่วมกับพลาสติกชนิด LDPE ปริมาณต่างๆ (30, 40, 50, 60 และ 70 ส่วนโดยน้ำหนัก) ดังสูตรในตารางที่ 4.5 (สูตร A1-A5 และ สูตร B1-B5 ตามลำดับ) ได้พอลิเมอร์เบลนดที่มีสมบัติดังนี้

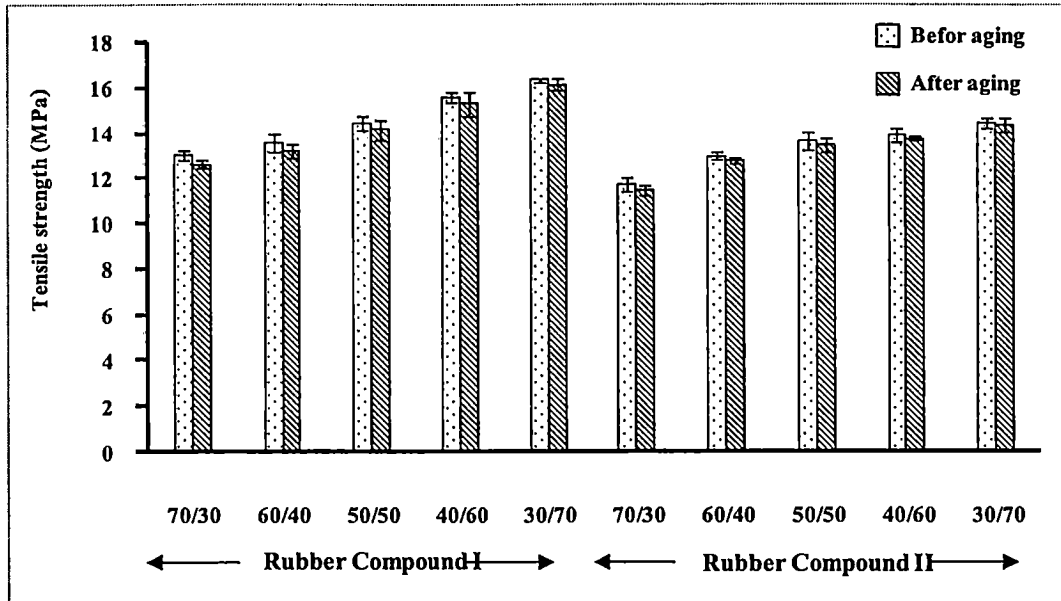
5.6.1 ความแข็ง (Hardness)



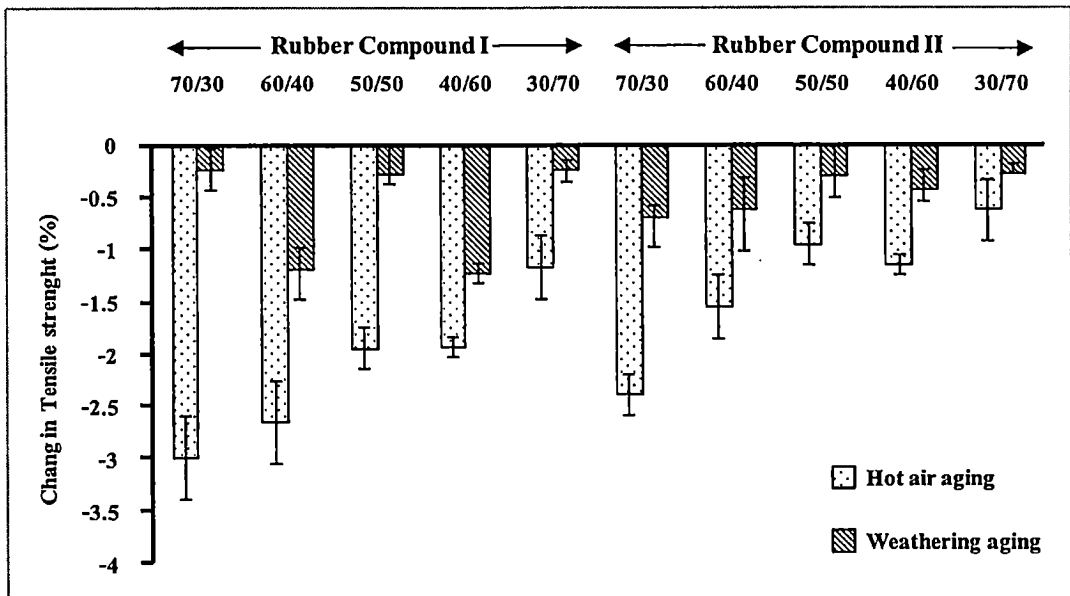
รูปที่ 5.34 ความแข็งพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 5.34 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วน 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 และ 30/70 มีความแข็งอยู่ในช่วงที่ต่างกันน้อยกว่า 5 Shore A โดยความแข็งเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ LDPE เนื่องจาก LDPE เป็นพลาสติกที่มี T_g สูง (110°C) จึงมีสภาพเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง สำหรับพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนเท่ากัน จะเห็นว่า Rubber compound II จะมีความแข็งมากกว่า Rubber compound I เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนดของ Rubber compound I มีส่วนของฟอสยาง NR และ EPDM เท่ากับ 70 และ 30 ส่วน Rubber compound II มีส่วนของฟอสยาง NR และ EPDM เท่ากับ 60 และ 40 ส่วนตามลำดับ ดังนั้น Rubber compound II มีสัดส่วนของยาง EPDM มากกว่า Rubber compound I และยาง EPDM ที่ใช้ในยางคอมปาวด์ คือ เกรด 7001 มีปริมาณของเอทิลีนสูงถึง 73% จึงทำให้ส่วนผสมของยางคอมปาวด์มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกค่อนข้างสูงที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้ Rubber compound II มีความแข็งมากกว่า Rubber compound I

5.6.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

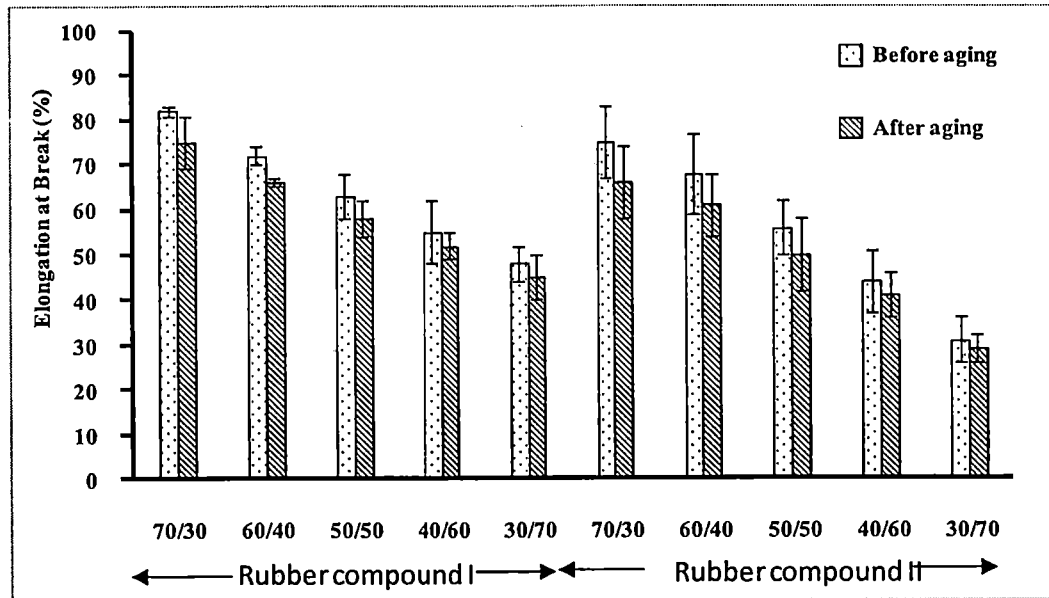


รูปที่ 5.35 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบสระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 ° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

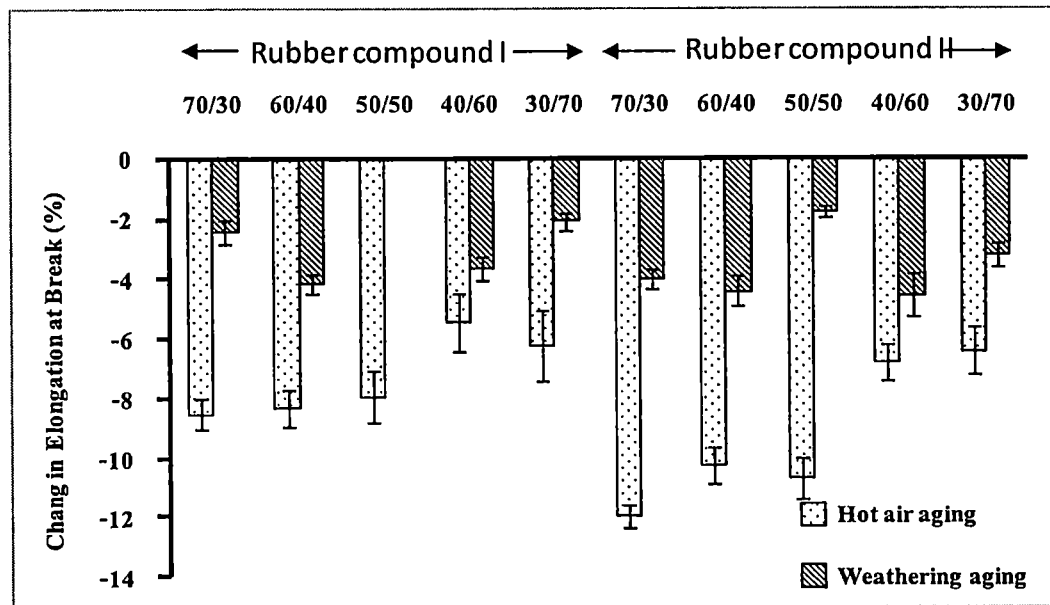


รูปที่ 5.36 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบสระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 ° C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และหลังการทดสอบความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม 30 วัน

5.6.3 ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)



รูปที่ 5.37 ความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลดอร์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 5.38 ความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลดอร์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และหลังการทดสอบความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม 30 วัน

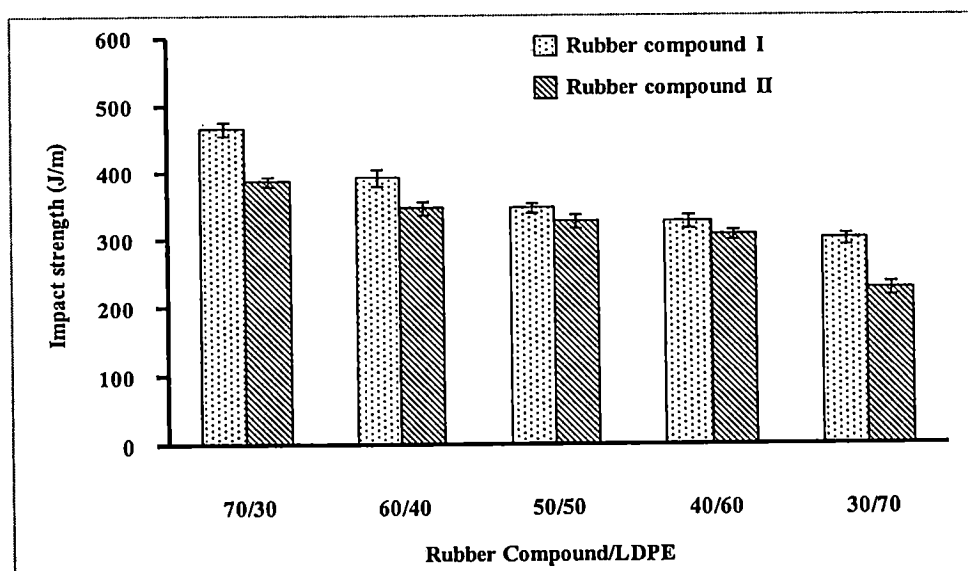
จากรูปที่ 5.35 และ 5.37 แสดงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลดอร์ระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE พบว่าทุกสัดส่วนของยางวัลคาไนซ์สูตรชุด Rubber compound I มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่ายางวัลคาไนซ์สูตรชุด Rubber compound II ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของจักรพงษ์ (2548) สำหรับ Rubber compound I และ Rubber compound II จัดเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (TPV) หากมีแรงมากจะทำต่อชิ้นงานของพอลิเมอร์ ส่วนที่เป็นพลาสติก

(LDPE) จะส่งแรงที่ได้รับมายังเฟสยาง (NR-EPDM-EVA) ซึ่งมีสมบัติของความยืดหยุ่นดี ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ในยางสูตร Rubber compound I ดีกว่ายางสูตร Rubber compound II เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนของ Rubber compound I มีส่วนของเฟสยาง NR และ EPDM เท่ากับ 70 และ 30 ส่วน สำหรับ Rubber compound II มีส่วนของเฟสยาง NR และ EPDM เท่ากับ 60 และ 40 ส่วน โดยยาง NR มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายาง EPDM ดังนั้น Rubber compound I ที่มีสัดส่วนของยาง NR มากกว่า จึงมีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีกว่ายาง Rubber compound II นอกจากนี้ลักษณะอนุภาคของ Rubber compound I มีส่วนของเฟสยางที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของ ใน Rubber compound II ดังแสดงในรูปที่ 5.41 และ 5.44 ตามลำดับ ส่งผลให้ Rubber compound I มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงดีกว่า Rubber compound II

สำหรับพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนผสมของ LDPE เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการยืดจนขาดจะลดต่ำลง เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ LDPE ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลนจะมีความลดต่ำลงตามสัดส่วนของ LDPE ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก LDPE เป็นพลาสติกมีความสามารถในการยืดได้น้อยกว่ายาง ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนที่มีสัดส่วนของ LDPE เพิ่มขึ้นจึงมีความสามารถในการยืดจนขาดลดลงด้วย

จากรูปที่ 5.36 และ 5.38 แสดงให้เห็นว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE หลังบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าหลังบ่มเร่งยางในสภาพแวดล้อมที่วางไว้ 30 วัน โดยสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบลนมีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า 5% ทั้ง Rubber compound I และ Rubber compound II ส่วนความสามารถในการยืดจนขาดของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE พบว่าหลังบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า 15% หลังวางในสภาพแวดล้อม 30 วัน ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า 5% เนื่องจากภายในส่วนผสมของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE มีเฟสพลาสติก (LDPE) ซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง และมีเฟสยาง (NR-EPDM-EVA) กระจายตัวอยู่ในเฟสของพลาสติก ทำให้พอลิเมอร์เบลนมีความทนทานต่อการถูกออกซิเดชันด้วยออกซิเจนในบรรยากาศ ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมสูง

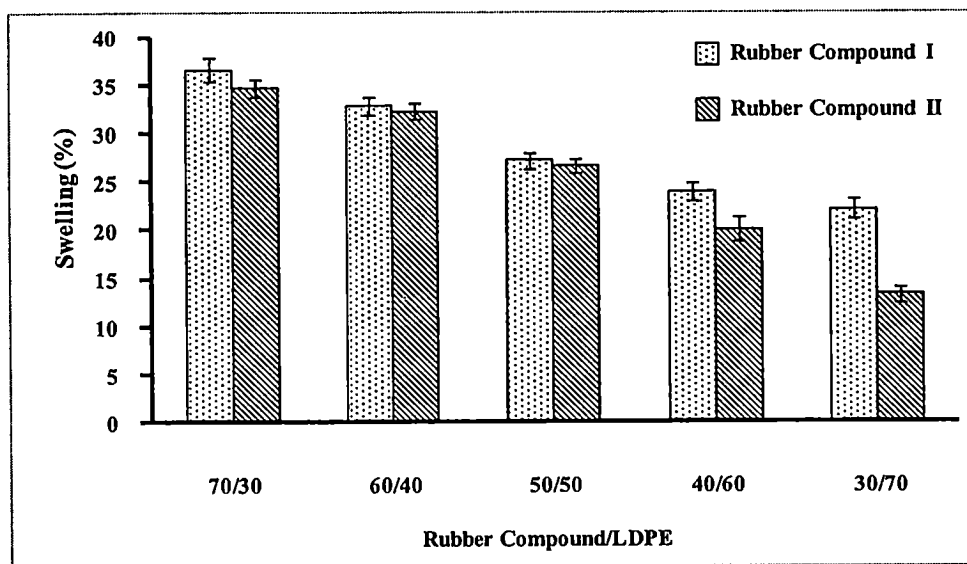
5.6.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength)



รูปที่ 5.39 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 5.39 จะเห็นว่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ทุกสัดส่วน Rubber compound I มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่า Rubber compound II เนื่องจาก Rubber compound I มีส่วนของยาง NR ในเฟสยาง (NR-EPDM-EVA) ปริมาณสูงกว่า Rubber compound II โดยเฟสยางจะเป็นส่วนที่รับแรงซึ่งส่งผ่านมาจากพลาสติก (LDPE) จึงทำให้ Rubber compound I มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกดีกว่า Rubber compound II สำหรับการเพิ่มสัดส่วนของพลาสติกในพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE พบว่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงแปรผกผันกับปริมาณของ LDPE เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน LDPE ที่เพิ่มขึ้น และเฟสยาง (NR-EPDM-EVA) ซึ่งกระจายตัวอยู่ซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงมีสัดส่วนลดน้อยลง

5.6.5 การบวมพอง (Swelling)



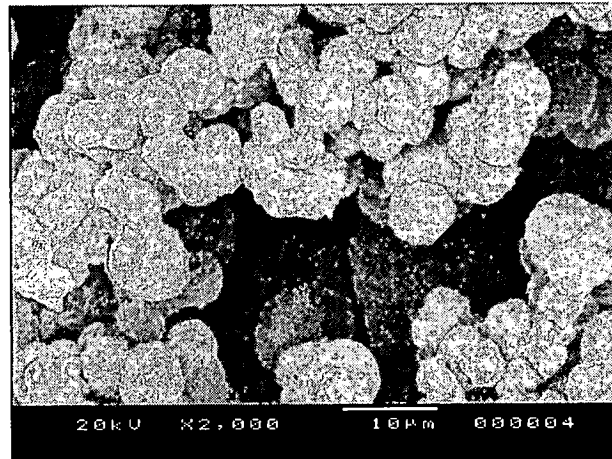
รูปที่ 5.40 การบวมพองของพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่สัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 5.40 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนมีค่าการบวมพองในตัวทำละลายโทลูอีนลดลงตามสัดส่วนของ LDPE เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE เป็นวัสดุ TPV ซึ่งลักษณะของสัณฐานวิทยาของพลาสติก (LDPE) จะเป็นเฟสต่อเนื่อง มีเฟสยาง (NR-EPDM-EVA) กระจายตัวอยู่ ทำให้พอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE มีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความอึดตัวสูง ส่งผลให้การบวมพองในตัวทำละลายน้อย สำหรับพอลิเมอร์เบลนระหว่าง NR-EPDM-EVA/LDPE ที่มี Rubber compound I และ II สัดส่วนเดียวกัน พบว่า Rubber compound II เกิดการบวมพองในตัวทำละลายได้น้อยกว่า Rubber compound I เนื่องจากส่วนของ Rubber compound II มียาง EPDM ในส่วนของเฟสยาง (NR-EPDM-EVA) มากกว่า Rubber compound I ส่งผลให้ Rubber compound II ซึ่งมียาง EPDM ที่มีโครงสร้างโมเลกุลอึดตัวสูง เกิดการบวมพองในตัวทำละลายน้อย

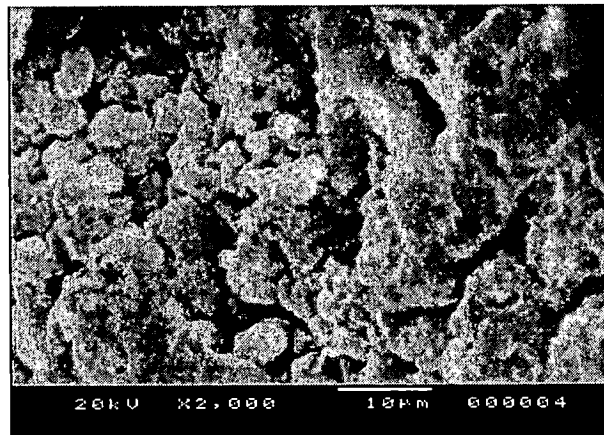
5.6.6 ลักษณะสัณฐานวิทยา

พอลิเมอร์เบลนที่ใช้สัดส่วนการเบลน NR-EPDM-EVA/LDPE สัดส่วน 70/30 และ 30/70 ใน Rubber compound I (สูตร A1 และ A5) และ Rubber compound II (สูตร B1 และ B5) ตามสูตรในตารางที่ 4.5 ใส่เศษยาง EVA เป็นสารตัวเติมปริมาณ 350 phr ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM ได้ผลดังรูปที่ 5.41-5.44

- ก) **Rubber compound I** :มีเฟสยาง NR/EPDM เท่ากับ 70/30 ใส่เศษยาง EVA 350 phr
นำมาผสมกับ LDPE โดย แปรสัดส่วน NR-EPDM-EVA/LDPE เท่ากับ 70/30 และ 30/70

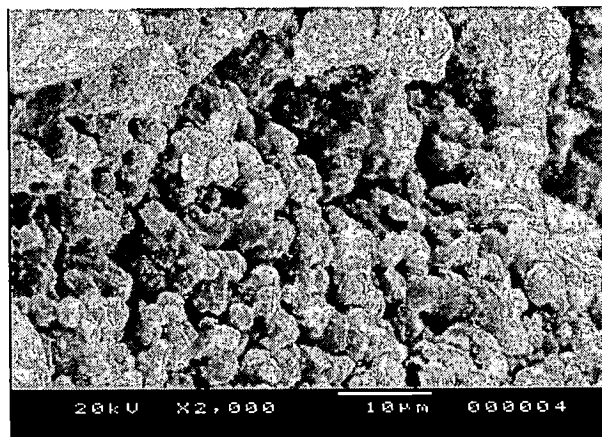


รูปที่ 5.41 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบสค์ NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound I สัดส่วน 70/30

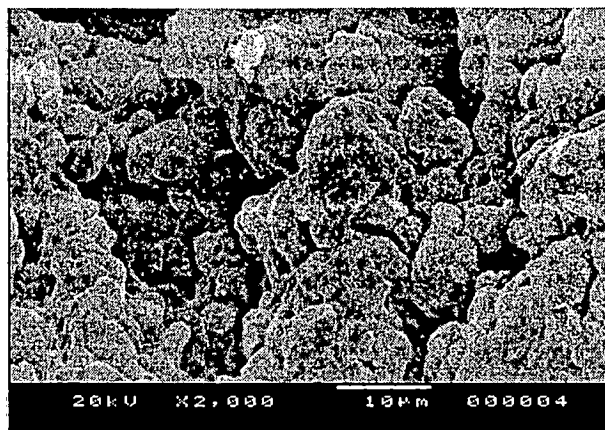


รูปที่ 5.42 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบสค์ NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound I สัดส่วน 30/70

- ข) **Rubber compound II** เฟสยาง NR/EPDM เท่ากับ 60/40 ใส่เศษยาง EVA 350 phr
นำมาผสมกับ LDPE โดย แปรสัดส่วน NR-EPDM-EVA/LDPE เท่ากับ 70/30 และ 30/70



รูปที่ 5.43 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบสค์ NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound II สัดส่วน 70/30



รูปที่ 5.44 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ NR-EPDM-EVA/LDPE สูตร Rubber compound II สัดส่วน 30/70

จากรูปที่ 5.41-5.44 จะเห็นว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของ Rubber compound I ในส่วนของเฟสยาง NR/EPDM เท่ากับ 70/30 ใส่เศษยาง EVA 350 phr เมื่อนำมาผสม LDPE สัดส่วน NR-EPDM-EVA/LDPE เท่ากับ 70/30 และ 30/70 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคยางจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามสัดส่วนของ LDPE ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก LDPE ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าต่ำลง ส่งผลให้แรงเฉือนในห้องผสมลดลง การกระจายตัวของอนุภาคยางจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำนองเดียวกัน Rubber compound II ซึ่งมีเฟสยาง NR/EPDM เท่ากับ 60/40 นำมาผสมกับ LDPE สัดส่วน NR-EPDM-EVA/LDPE เท่ากับ 70/30 และ 30/70 จะมีการกระจายตัวของอนุภาคยางเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามลักษณะอนุภาคของ Rubber compound I มีการกระจายตัวและขนาดใหญ่กว่า Rubber compound II ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด คือ สัดส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ NR-EPDM-EVA/LDPE เท่ากับ 70/30 เพราะมีขนาดอนุภาคของเฟสยางที่กระจายในพลาสติกเล็กที่สุด

6. สรุป

เศษยาง EVA รีดด้วยเครื่อง Two roll mill และบดผ่านเครื่องย่อยพลาสติก ใช้เป็นสารตัวเติมในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ใช้เทคนิคการผสมสารเคมีทุกชนิดลงไปในยาง EPDM ก่อน แล้วจึงผสมกับยางธรรมชาติ

ระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมของยางเบลนด์ระหว่าง NR /EPDM คือ ระบบกัมมะธัน การเพิ่มสัดส่วนยาง EPDM ส่งผลให้ค่าทอร์คต่ำสุด (ML), ค่าทอร์คสูงสุด (MH), และเวลาสก็อต (TS_2) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ช้าลง สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด มีค่าลดลง ส่วนสมบัติ 100%มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนยาง EPDM ที่เพิ่มขึ้น ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

การเพิ่มเศษยาง EVA ในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ส่งผลให้ ค่าทอร์คต่ำสุด (ML) และเวลาสก็อต (TS_2) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทอร์คสูงสุด (MH) มีค่าลดลง และอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ช้าลง โดยเศษยาง EVA ใส่ในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ปริมาณสูงสุด 350 phr มีสมบัติความหนืด ความแข็ง การดูดกลืนพลังงาน และการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามเศษยาง EVA ที่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง โดยสัดส่วนยางเบลนด์ระหว่าง NR และ EPDM ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง คือ NR/EPDM 70/30 และ 60/40

การเพิ่มสัดส่วนของ LDPE ในยางเบลนด์ระหว่าง NR/EPDM ส่งผลให้ความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ ความสามารถในการยืดจนขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก และความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลาย มีค่าลดลง สัดส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ NR-EPDM-EVA/LDPE ที่เหมาะสมเท่ากับ 70/30 ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

7. ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมการใช้วัตถุดิบชนิด thermoplastic มีส่วนผสมของยาง EVA ที่เบลดระหว่าง NR/EPDM ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางรองพื้นปูทางเดินสระว่ายน้ำ ขึ้นรูปด้วยเทคนิค injection molding ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติทนทานต่อการใช้งาน มีความเสียดทานสูง ป้องกันการลื่นไถล และสามารถจำหน่ายได้เชิงการค้า

8. เอกสารอ้างอิง

จักรพงษ์ รักษาพราหมณ์. 2549. การเตรียมวัสดุผงหลังจากยางขยะและพลาสติกกรีไซเคิล. วิทยานิพนธ์สาขาเทคโนโลยี ยาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เสาวนีย์ ก่อวุฒิภูรังษี และจุฑารัตน์ คำปิ่น. 2551. การใช้เศษยาง EVA ที่เหลือใช้สำหรับทำแผ่นยางรองพื้นสนามเด็กเล่น. โครงการวิจัย IPUS1 เลขที่โครงการ I151A05003

เสาวนีย์ ก่อวุฒิภูรังษี อัญรัตน์ เกียรติเสรีกุลและวุฒิชัย ศรีจันทร์ 2551. การใช้เศษอีวีเอที่เหลือใช้เพื่อเป็นสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็มที่เบลดกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. โครงการวิจัย IPUS1 เลขที่โครงการ เลขที่โครงการ I151A05004

ศุลยพงษ์ ศุลยพิทักษ์. 2551. พิธีกรรมของยาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บุญธรรม นิธิอุทัย. 2535. ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และคุณสมบัติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2535. เทคนิคการออกสูตรยาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วัชรพงษ์ ทุมบุญ. 2548. ผลของการใช้เศษฟองน้ำเป็นสารตัวเติมต่อสมบัติของยาง. วิทยานิพนธ์สาขา เทคโนโลยียาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Hassan, A., Wahlt, M.U. and Chee, C.Y. 2003. Mechanical and morphological properties of PP/NR/LLDPE ternary blend effect of HVA-2. Polymer Testing, 22 : 281-290.

Ismail, H., Nordin, R., Noor, A.M. 2002. Cure Characteristics, tensile properties and swelling behaviour of recycled rubber powder – filled natural rubber compounds. Polymer Testing, 21 : 565-569.

Jansen, P. and Soares, B.G. 1996. Effect of compatibilizer and curing system on the thermal degradation of natural rubber/EVA copolymer blends. Polymer Degradation and Stability, 52 : 95-99.

Phinyocheep P., Axtell, F.H. and Laosee, T. 2002. Influence of compatibilizers on mechanical Properties, crystallization and morphology of polypropylene/scrap rubber dust blends. J. Appl. Polym. Sci., 86(1):148-159.

ภาคผนวก

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

“การใช้เศษยางอีวีเอทีเหลือใช้จากอุตสาหกรรมรองเท้าเป็นสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็มเบลนด์ยางธรรมชาติและพลาสติก”

(สัญญาเลขที่ RDG5250026)

ข้อคิดเห็นข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
ความเห็นด้านวิชาการ (Technical) 1. การทดสอบสมบัติต่างๆ ต้องระบุด้วยว่าใช้วิธีใด / มาตรฐานใดในการทดสอบ 2. ผลการวิจัยนี้ได้ขงที่มีคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งควรเปรียบเทียบกับ spec. ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเป้าหมายประสงค์ว่า สมบัติเหล่านี้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่ เมื่อเทียบกับสิ่งที่ทำอยู่ในปัจจุบัน 3. ในส่วนของข้อเสนอแนะ ขอให้เพิ่มเติมเป็น flow chart/road map ระบุผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่คาดหวัง (ซึ่งเมื่อดูจากหัวข้อที่ 1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย) น่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ thermoplastic เป็นวัตถุดิบจึงควรระบุเป็นผลิตภัณฑ์อะไร บ่งชี้ milestone ตามลำดับว่าได้อะไร จากโครงการใด ยังขาดจุดที่ควรทำอะไร อีกทั้งโครงการที่ต้องทำ เพื่อที่จะได้บรรลุ goal ที่ตั้งไว้	1. ใช้มาตรฐาน ASTM ดังระบุในหน้า 2 และหน้า 5 คือ ASTM D1646 , ASTM D2240 และ ASTM D412 2. งานวิจัยนี้ไม่ได้ระบุชนิดของผลิตภัณฑ์ จึงไม่ได้เทียบกับ spec. ของผลิตภัณฑ์ไว้ อย่างไรก็ตามสามารถทำผลิตภัณฑ์ยาง เช่น ยางปูพื้นทางเดินสระว่ายน้ำ ซึ่งมีสมบัติความเสียดทานสูง ป้องกันการลื่นไถลดี 3. รับพิจารณา ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม flow chart จะเสนอในโครงการวิจัยต่อไป มีผลิตภัณฑ์เป้าหมาย (goal) ที่คาดหวัง คือ ยางรองพื้นปูทางเดินสระว่ายน้ำ ใช้วัตถุดิบชนิด thermoplastic ขึ้นรูปด้วยเทคนิค injection molding ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติความเสียดทานสูง (เป็น milestone) สามารถจำหน่ายได้เชิงการค้าได้