

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ยางผสมชนิดใหม่ : ยางธรรมชาติผสมโพลิเอททิลีนชนิด
ความหนาแน่นต่ำมาก
(New Natural Rubber blended with ULDPE)

คณะผู้วิจัย

1. ดร. วราภรณ์ ตันรัตนกุล (หัวหน้าโครงการ)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. รศ.ดร. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา (นักวิจัยที่ปรึกษา)
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการวิจัยหลังปริญญาเอก ปี 2540

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

●ผู้อุปถัมภ์วัดฤติบและสารเคมี : บริษัท ดาวเน็คมิลคอล (ประเทศไทย) จำกัด
บริษัท ชันนิเวลด์ จำกัด บริษัท ไบเยอร์ (ประเทศไทย) จำกัด และ หจก. ป. สยาม
อุตสาหกรรมยาง

●Dr. Gan Seng Neon, University of Malaya, Malaysia ในความอนุเคราะห์ให้คำ
ปรึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

●ศูนย์วิจัยยางสงขลา ในความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง ODR และการทดสอบ
คุณสมบัติความต้านทานต่อการหักงอ

●ภาควิชาเทคโนโลยีการยางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ในความอนุเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติ
ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

●ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่ ในความอนุเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติความต้านทานต่อการ
ขัดถู

●ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการอำนวยความสะดวก
สะดวกในการใช้เครื่อง SEM และ DSC

●คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในความ
อนุเคราะห์การใช้สถานที่ อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำ
วิจัย

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของนักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
ดังรายนามต่อไปนี้

- นางสาวดารุวรรณ อ่องเอื้อ (นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2540)
- นางสาวกมลรัตน์ หอมหวล (นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2540)
- นายนิรุช บุญแย้ม (นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2540)
- นางสาวนิภาณูจน์ ดีพันธ์ (นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2541)
- นายเวนิต จงไกรจักร (นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2541)

ท้ายนี้คณะวิจัยขอขอบพระคุณรัฐบาลไทยและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยเป็นอย่าง
สูง ที่ให้การสนับสนุนทางการเงินแก่งานวิจัยนี้ ภายใต้โครงการเลขที่ PDF/83/2540

บทคัดย่อ

โครงการเลขที่: PDF/83/2540

ชื่อโครงการวิจัย: ยางผสมชนิดใหม่ : ยางธรรมชาติผสมโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก

นักวิจัย: ดร. วราภรณ์ ดันรัตนกุล (สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

รศ. ดร. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

E-mail Address : tvarapor@ratree.psu.ac.th

ระยะเวลาที่ทำวิจัย: 1 สิงหาคม 2540 - 31 กรกฎาคม 2542

วัตถุประสงค์: 1. ผลิตยางผสมชนิดใหม่ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก

2. ตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางผสมชนิดใหม่กับยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสบิอาร์ และศึกษาความเข้ากันได้ดีของยางผสมชนิดใหม่

กระบวนการวิจัย: NRผสมกับULDPEในอัตราส่วน70/30 60/40 และ 50/50 (w/wt) ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง วัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ภายในเครื่องอัด นำแผ่นซีทที่ได้ตัดเป็นชิ้นงาน เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐานASTM NRถูกผสมกับSBRภายใต้วิธีการผสมจนถึงการเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่นเดียวกับยางผสมNR/ULDPE ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางผสมทั้งสองชนิดนี้

ผลที่ได้จากการวิจัย: ยางผสมNR/ULDPEมีคุณสมบัติเชิงกลด้านดึงยึด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และคุณสมบัติเชิงกลด้านดึงยึดหลังจากได้รับความร้อนและออกซิเจน ดีกว่ายางผสมNR/SBR แต่มีความต้านทานต่อการขัดถูและความต้านทานต่อการหักงอต่ำกว่า ค่าความหนืดมูนีและค่าการกระดอนของยางผสมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความแข็งของยางผสมชนิดใหม่นี้มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ยางผสมNR/ULDPEมีลักษณะแยกเฟสระดับโมเลกุล แต่ผสมเข้ากันได้ดีโดยไม่ต้องมีวัสดุอื่นช่วย พอลิเมอร์ทั้งสองจะมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องเมื่อมีอัตราส่วนเท่ากัน(50/50)

สาระสำคัญของผลที่ได้: ยางผสมNR/ULDPEและมีลักษณะเป็น compatible blend และแสดงคุณสมบัติเชิงกลด้านดึงยึดใกล้เคียงกับNRและดีกว่ายางผสมNR/SBR ยางผสมชนิดใหม่สามารถใช้แทนยางผสมNR/SBRได้ในกรณีที่คำนึงถึงคุณสมบัติต่อไปนี้: คุณสมบัติด้านดึงยึด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพหลังจากได้รับความร้อนและออกซิเจน

ข้อเสนอแนะ: งานวิจัยที่จะทำต่อคือการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงมอร์โฟโลยี วัลคาไนซ์ULDPEด้วยเปอร์ออกไซด์รวมทั้งมีการเติมเขม่าดำ(carbon black) สิ่งเหล่านี้จะมีผลกระทบโดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลและทางกายภาพ อาจทำให้มีการปรับปรุงข้อด้อยที่เกิดขึ้นได้

Keywords : natural rubber, ULDPE, polymer blend, rubber blend, thermoplastic natural rubber

Abstract

Project Code: PDF/83/2540

Project Title : New Natural Rubber blended with ULDPE

Investigators: Dr. Varaporn Tanrattanakul (Polymer Science Program, Faculty of Science,
Prince of Songkla University)

Asso. Prof. Werasak Udomkichdech (Department of Materials Science,
Faculty of Science, Chulalongkorn University)

E-mail Address: tvarapor@ratree.psu.ac.th

Project Period : August 1, 1997 - July 31, 1999

Objectives :

1. To produce a new Natural Rubber Blend by blending with ultra-low-density polyethylene
2. To investigate properties of the new Natural Rubber Blend and compare these properties with those of NR/SBR blend, and to observe compatibility of the new Natural Rubber Blend

Methodology : Natural Rubber (NR) was blended with ultra-low-density polyethylene (ULDPE) by using a two-roll mill. Blend compositions included 70, 60 and 50 wt%NR. Conventional vulcanization with sulfur was done by using a compression mold producing rubber sheets. Physical and mechanical properties were tested according to ASTM. These properties were compared to those of NR/SBR blends which prepared under same method.

Results : Tensile properties, tear and aging (oxidation) resistances of NR/ULDPE blend are better than those of NR/SBR blend. Abrasion and flex cracking resistance of the new blend are lower than those of NR/SBR blend. Mooney viscosity and resilience of both blends fall in the same range, whereas hardness of the new blend is slightly higher than that of NR/SBR blend. Blend of NR and ULDPE is immiscible but compatible, compatibilizer is not necessary for this blend. Co-continuous phase is observed in the blend of 50/50 NR/ULDPE. NR does not significantly effect on crystallization behavior of ULDPE.

Conclusion : Compatible NR/ULDPE blend is prepared. This new blend shows tensile properties, tear and aging resistances as good as NR, and better than NR/SBR blend. It is the good promising to replace NR/SBR blend with NR/ULDPE blend.

Suggestions : Future work is preparing the blend in an internal mixer, which will add carbon black for reinforcement and peroxide for ULDPE curing. These may change blend morphology and mechanical properties of the new blend.

Keywords : natural rubber, ULDPE, polymer blend, rubber blend, thermoplastic natural rubber

ສາ​រ​ນ័​យ

กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ii
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	iii
สารบัญ	iv
รายชื่อตาราง	v
รายชื่อรูปภาพ	vii
สรุปย่อโครงการ (Executive Summary)	1
1. บทนำ	3
2. วัตถุประสงค์ สารเคมี และเครื่องมือ	
2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	10
2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมยางผสม	10
2.3 วิธีการเตรียมยางคอมปาวด์	10
2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติและวิธีการทดสอบ	11
3. การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดสูตร	
3.1 การทดลองที่ 1 : การหาสูตรที่เหมาะสม	15
3.2 การทดลองที่ 2 : การเตรียมยางธรรมชาติเหลว	17
3.3 การทดลองที่ 3 : การศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลวที่มีต่อคุณสมบัติตั้งยัดของยางผสมNR/ULDPE	19
4. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่ 1	
4.1 วัตถุประสงค์	32
4.2 วิธีการทดลอง	32
4.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง	33
4.4 สรุปผลการทดลอง	37
5. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่ 2	
5.1 วัตถุประสงค์	64
5.2 วิธีการทดลอง	64
5.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง	66
5.4 สรุปผลการทดลอง	69
6. มอร์โฟโลยีของยางผสม	
6.1 วัตถุประสงค์	88
6.2 วิธีการทดลอง	88
6.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง	88
6.4 สรุปผลการทดลอง	90

รายชื่อตาราง

1. บทนำ

ตารางที่1.1 สมบัติทางกายภาพของ ULDPE ENGAGE[®] 8150 (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

3. การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดสูตร

ตารางที่3.1 อักษรย่อแทนยางผสมแต่ละชนิด

ตารางที่3.2 สูตรคอมปาวด์เบื้องต้น

ตารางที่3.3 คุณสมบัติ การดึงยืด(Tensile properties)ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBRและยางผสมNR/ULDPEที่เตรียมจากสูตรที่1-สูตรที่3

ตารางที่3.4 ค่าIntrinsic viscosity (IV) ของยางธรรมชาติเหลวที่คำนวณได้จากค่า Reduced viscosity

ตารางที่3.5 ค่าIntrinsic viscosity (IV) ของยางธรรมชาติเหลวที่คำนวณได้จากค่า Inherent viscosity

ตารางที่3.6 คุณสมบัติการดึงยืด(Tensile properties)ของNRและยางผสมNR/ULDPEที่มียางธรรมชาติเหลวเป็นองค์ประกอบ

4. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม :การทดลองชุดที่1

ตารางที่4.1 คุณสมบัติการดึงยืด(Tensile properties)ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3)และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

ตารางที่4.2 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด(Tear resistance)ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

ตารางที่4.3 ค่าความแข็ง(Hardness)ของNR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

ตารางที่4.4 ค่าการกระดอน(Resilience)ของNR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

ตารางที่4.5 ค่าความต้านทานต่อการหักงอ(Flex cracking resistance)ของยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3 แต่เพิ่มปริมาณซิลิเฟอร์เป็น 2.5 phr)

5. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่2

- ตารางที่5.1 เปรียบเทียบสูตรคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดลองชุดที่1ในบทที่4และสูตรคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดลองชุดปัจจุบัน(สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่5.2 คุณสมบัติการดึงยืด(Tensile properties)ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่5.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดึงยืด(Tensile properties)ระหว่างสูตรเก่า(สูตรที่2, Old)และสูตรปรับปรุง(New) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)
- ตารางที่5.4 ค่าความแข็ง(Hardness)และการกระดอน(Resilience) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR และยางผสมNR/ULDPE (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็ง(Hardness)และการกระดอน(Resilience)ระหว่างสูตรเก่า(สูตรที่2, Old)และสูตรปรับปรุง(New) ของNR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)
- ตารางที่5.6 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู(Abrasion resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR และยางผสมNR/ULDPE (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่5.7 คุณสมบัติการดึงยืดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่5.8 คุณสมบัติการดึงยืดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ(Aging resistance)ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง แต่ไม่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนท์)
- ตารางที่5.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยืดหลังการเสื่อมสภาพ(Aging resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่5.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยืดหลังการเสื่อมสภาพ(Aging resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง แต่ไม่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนท์)
- ตารางที่5.11 ค่าความหนืดมูนนี่(Mooney viscosity) ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ไม่มีสารเคมีเป็นส่วนผสม)

6. มอร์โฟโลยี(Morphology)ของยางผสม

- ตารางที่6.1 ผลการทดลองวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่องดีเอสซี(DSC)

รายชื่อรูปภาพ

2. วัตถุดิบ สารเคมี และเครื่องมือ

รูปที่ 2.1 ภาพวาดแสดงการเตรียมยาง(ผสม)คอมปาวด์ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง

3. การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดสูตร

รูปที่3.1 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 5%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 5%

รูปที่3.2 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 10%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 10%

รูปที่3.3 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 15%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 15%

รูปที่3.4 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 20%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 20%

รูปที่3.5 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 (2) 5%; (3) 10%; (4) 15%; (5) 20%

รูปที่3.6 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 (2) 5%; (3) 10%; (4) 15%; (5) 20%

4. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่1

รูปที่4.1 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

รูปที่4.2 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของSBR ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

รูปที่4.3 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

รูปที่4.4 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB1(30%SBR) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

- รูปที่4.5 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB2(40%SBR) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.6 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB3(50%SBR) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.7 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB4(30%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.8 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB5(40%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.9 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB6(50%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.10 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR SBR และULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.11 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR SBR และB1-B3 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.12 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR ULDPE และB4-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาด(Tensile strength) ที่ได้จากการทดลอง (E) และที่ได้จากการคำนวณ (C) ของยางผสมNR/SBR (SBR) และยางผสมNR/ULDPE (PE)
- รูปที่4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะยืดที่จุดขาด(Elongation at break) ที่ได้จากการทดลอง (E) และที่ได้จากการคำนวณ (C) ของยางผสมNR/SBR (SBR) และยางผสมNR/ULDPE (PE)
- รูปที่4.15 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves) ระหว่างB1(30%SBR)และB4(30%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.16 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves) ระหว่างB2(40%SBR)และB5(40%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.17 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves) ระหว่างB3(50%SBR)และB6(50%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.18 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของยางผสมB1-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความต้านทานการฉีกขาด(Tear resistance) ที่ได้จากการทดลอง (E) และที่ได้จากการคำนวณ (C) ของยางผสมNR/SBR (SBR) และยางผสมNR/ULDPE (PE)

- รูปที่4.20 กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของNR SBR และULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม. /นาที
- รูปที่4.21 กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของNR SBR และB1-B3 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม. /นาที
- รูปที่4.22 กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของNR ULDPE และB4-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม. /นาที
- รูปที่4.23 กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของยางผสมB1-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม. /นาที

5. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่2

- รูปที่5.1 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR SBR และULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่5.2 กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของยางผสมB1-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที
- รูปที่5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสที่300%(Modulus at 300%) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)
- รูปที่5.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสที่600%(Modulus at 600%) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)
- รูปที่5.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาด(Tensile strength) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)
- รูปที่5.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะยืดที่จุดขาด(Elongation at break) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)
- รูปที่5.7 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่300%(Modulus at 300%) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของNR SBR ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(PAN)และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(no PAN)

- รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่ 600% (Modulus at 600%) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (no PAN)
- รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงที่จุดขาด (Tensile strength) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (no PAN)
- รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (no PAN)

6. มอร์โฟโลยี (Morphology) ของยางผสม

- รูปที่ 6.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 3 วัน (a) NR; (b) SBR; (c) B3 (50% SBR)
- รูปที่ 6.2 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของ B6 (50% ULDPE) (a) ชิ้นงานก่อนแช่พาราไซลีน; (b) ชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 5 วัน
- รูปที่ 6.3 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 5 วัน (a) B5 (40% ULDPE); (b) B4 (30% ULDPE)
- รูปที่ 6.4 DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งแรก (first heating scan)
- รูปที่ 6.5 DSC thermograms จากการทำให้เย็นลง (cooling scan)
- รูปที่ 6.6 DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan)

Executive Summary

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้มีดังนี้ (1) ทำยางผสมชนิดใหม่ที่มียางธรรมชาติ (NR) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยผสมกับโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (ULDPE) ซึ่งมีความหนาแน่น 0.868 กรัม/ซม.³ (2) ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของยางผสมชนิดใหม่ โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของยางผสมระหว่างNRและยางเอสบีอาร์(SBR) และ (3) ศึกษาความเข้ากันได้ดี (compatibility) ของยางผสมชนิดใหม่

ยางผสมNR/ULDPEและยางผสมNR/SBR เตรียมโดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 70 - 80°C. ยางผสมถูกเตรียมขึ้นสามอัตราส่วน คือ 70 60 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของNR สารเคมีที่ใช้เพื่อวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ด้วยเทคนิคปกติ นั้น คัดตามน้ำหนักของยางที่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ได้ ยางธรรมชาติเหลว(liquid NR)ได้เตรียมขึ้นจากน้ำยางข้น และนำมาผสมในยางผสมNR/ULDPE โดยคาดว่าจะทำให้คุณสมบัติของยางผสมดีขึ้น ได้ศึกษาปริมาณของสารเคมีที่ใช้เตรียมยางคอมปาวด์เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดี พบว่าสูตรคอมปาวด์ที่เหมาะสมคือ ยาง 100 phr, ZnO 5 phr, stearic acid 2 phr, PAN[®] 1 phr, CBS[®] 1.2 phr, sulfur 2.5 phr การวัลคาไนซ์ทำด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิ 140°C. เป็นเวลา 30 นาที โดยทำเป็นแผ่นซีทที่มีความหนา 1 มม. และ 3 มม. แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆตามมาตรฐาน ASTM

ยางผสมNR/ULDPEมีลักษณะเข้ากันได้ดีมาก และจัดเป็น compatible blend ซึ่งสังเกตได้จากกระบวนการผสมและคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืด(tensile properties)ที่แสดงคุณสมบัติสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะสองเฟสจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ULDPEมีลักษณะเป็นเฟสไม่ต่อเนื่อง(discontinuous phase)เมื่อมีอัตราส่วน 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ยางผสมจะแสดงลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องร่วม(co-continuous phase) เมื่อทั้งNRและULDPEมีน้ำหนักเท่ากัน (50/50) ยางธรรมชาติเหลวไม่ได้เพิ่มคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืดของยางผสม และทำให้กระบวนการผสมยุ่งยากมากขึ้น ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเหลวหรือวัสดุอื่นๆเพื่อเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสมNR/ULDPE

ค่าความหนืดมูนนี่(Mooney viscosity) และค่าการกระดอน(resilience)ของยางผสมNR/ULDPEมีค่าใกล้เคียงกับยางผสมNR/SBR แต่ค่าความแข็ง(hardness Shore A)ของยางผสมNR/ULDPEมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ลักษณะการเกิดผลึกจากการดึงยืด(strain-induced crystallization)ของNRในยางผสมไม่ต่างจากNR พฤติกรรมความเป็นผลึกของULDPEในยางผสมไม่เปลี่ยนแปลง คุณสมบัติต่อไปนี้ของยางผสมNR/ULDPEดีกว่ายางผสมNR/SBR : คุณสมบัติการดึงยืด(tensile properties) ความต้านทานต่อการฉีก(tear resistance) และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ(aging resistance)หรือคุณสมบัติการดึงยืดหลังการอบด้วยความร้อนและออกซิเจน(oxidation resistance) แต่ค่าความต้านทานต่อการขัดถู(abrasion resistance)และความต้านทานต่อการหักงอ(flex cracking resistance) ของยางผสมNR/ULDPEด้อยกว่ายางผสมNR/SBR ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่ULDPEไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล (cross-links)

จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ สรุปได้ว่า โครงการวิจัยได้บรรลุวัตถุประสงค์ คือ สามารถเตรียมยางผสมชนิดใหม่นี้ได้ ซึ่งยางทั้งสองชนิดนี้เข้ากันได้ดีในกระบวนการผสม ยางผสมชนิดใหม่ให้คุณสมบัติทั้งที่ดีกว่าและด้อยกว่ายางผสมNR/SBR คุณสมบัติที่ด้อยกว่าของยางผสมชนิดใหม่นี้ น่าจะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลของULDPE ดังนั้นจึงเป็นสัญญาณที่ดีว่า ยางผสมชนิดใหม่นี้ น่าจะใช้แทนยางผสมNR/SBRได้ ในงานที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืดและความทนทานต่อโอโซนที่ดีขึ้น

โครงการวิจัยนี้เป็นงานทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ สำหรับการเตรียมยางผสมNR/ULDPE ดังนั้นข้อมูลที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม ยังมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการทดลองต่อไปในแง่วิธีการผสม การเติมเขม่าดำ(carbon black)และสารเคมีอื่นๆ และตรวจสอบคุณสมบัติด้านอื่นๆอีก สิ่งเหล่านี้จะทำให้นักวิจัยและนักอุตสาหกรรมสามารถมองสู่ทางในการนำยางผสมชนิดใหม่นี้ไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมของประเทศได้

1. บทนำ

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นเวลาเกือบสี่ร้อยปีมาแล้ว ประเทศไทยมีการปลูกยางธรรมชาติมาเป็นเวลาร่วมหนึ่งร้อยปีและปัจจุบันนี้ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก วิวัฒนาการด้านเทคโนโลยีของยางธรรมชาติได้มีการพัฒนาต่อเนื่องตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน [1-3] เช่น การทำยางธรรมชาติที่มีความหนืดคงที่ การทำยางธรรมชาติเหลว การเชื่อมโยง methyl methacrylate(MMA) บนสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ(MGMR) การเติมน้ำมันลงไปในยางธรรมชาติ(OENR) การทำอีพ็อกซีเคชัน(ENR) การผสมยางธรรมชาติกับพลาสติก(TPNR) การนำยางธรรมชาติไปใช้กับสะพาน การนำยางธรรมชาติไปใช้กับอาคารสิ่งก่อสร้างในบริเวณที่มีแผ่นดินไหว การนำยางธรรมชาติไปใช้ในยางรถยนต์และพาหนะอื่นๆ การทำถุงมือยางที่ไม่ต้องใช้แป้ง การทำถุงมือยางที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ(DPNR) สิ่งเหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของวิวัฒนาการเท่านั้น ยังมีอุตสาหกรรมอื่นๆอีกที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ

อุตสาหกรรมที่บริโภคยางธรรมชาติมากที่สุด คือ อุตสาหกรรมรถยนต์ ยางธรรมชาติจะถูกผสมด้วยยางสังเคราะห์ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้ 1) ปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น 2) ลดต้นทุนการผลิต หรือ 3) ปรับปรุงกระบวนการผลิตการแปรรูป การทำยางผสม(rubber blends)เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ เป็นการง่ายกว่าที่จะสังเคราะห์ยางชนิดใหม่ ถ้าหากกระบวนการผสมนั้นทำอย่างถูกต้อง ยางผสมส่วนใหญ่จะไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล คือ ส่วนใหญ่จัดเป็น immiscible blend ซึ่งการไม่เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลนี้ให้ผลดีและเป็นที่ต้องการของการทำยางผสม เพราะยางผสมจะแสดงคุณสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดออกมา แต่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ยางผสมจะมีลักษณะที่เข้ากันได้ดีที่เรียกว่า compatibility อย่างไรก็ตามไม่เป็นการง่ายนักที่จะนำยางชนิดต่างๆมาผสมกัน แล้วได้ยางผสมที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เนื่องจากปัญหาความไม่เข้ากันหรือไม่ชอบผสมกัน(uncompatibility)ของยางผสม ปัญหาด้านการวัดคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดที่มีอัตราเร็วไม่เท่ากัน ปัญหาการกระจายตัวของสารตัวเติมต่างๆโดยเฉพาะเขม่าดำ(carbon black) ปัญหาเหล่านี้จะเกิดมากขึ้นในคู่ของยางผสมที่มีความแตกต่างด้านพันธะคู่หรือความเป็นขั้วต่างกันมากขึ้น กล่าวได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ คือ 1) อัตราส่วนผสมของยาง 2) มอร์โฟโลยี(morphology)ของยางผสม 3) แรงดึงดูดระหว่างยางทั้งสอง (interfacial adhesion) และ 4) การกระจายตัวของตัวเชื่อมโยงและสารเติมแต่งต่างๆ การศึกษายางผสมจากยางธรรมชาติได้ทำกันมานานและศึกษากันอย่างแพร่หลาย [4-10] การศึกษายางผสมส่วนใหญ่มักจะมุ่งเน้นที่คุณสมบัติเชิงกายภาพต่อไปนี้ ความหนืดและการบวมจากการอัดรีด(melt viscosity and die swell) การเหนียวและความแข็งแรง(tack and green strength) ค่าโมดูลัส(modulus) ฮิสเทอเรซิส(hysteresis) คุณสมบัติการดึงยึด(tensile properties) ความต้านทานต่อการฉีกขาด(tear resistance) ความต้านทานการเหนื่อยล้า(fatigue resistance) ความต้านทานต่อการขัดถู(abrasion resistance) ความต้านทานต่อการแตก(cracking and cut growth) ความต้านทานต่อโอโซน(ozone attack) การนำไฟฟ้า(electrical conductivity)

ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์นำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์เป็นปริมาณมาก เป็นที่ทราบกันดีว่ายางเอสปีอาร์มีคุณสมบัติต่อไปนี้ดีกว่ายางธรรมชาติ ความต้านทานต่อการแตกหักสูงกว่า(crack resistance) มีwet grip ดีกว่า และ ทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่า(weather resistance) ส่วนคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่เด่นกว่าคือ แข็งแรงกว่า มีความร้อนสะสมต่ำกว่า และทนอุณหภูมิได้ต่ำกว่าโดยยังแสดงลักษณะที่ดีอยู่ สัดส่วนของการผสมของยางคู่นี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการเตรียมยางผสมคู่นี้เพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี แต่เป็นที่เข้าใจกันว่ายางเอสปีอาร์ต้องการซัลเฟอร์น้อยกว่าและต้องการสารตัวเร่งมากกว่ายางธรรมชาติเนื่องจากยางเอสปีอาร์มีพันธะคู่น้อยกว่า เทคโนโลยีการผสมยางคู่นี้เพื่อให้ได้คุณสมบัติหลังวัลคาไนซ์ดีนั้น ได้พัฒนาขึ้นในบริษัทผลิตยางรถยนต์ต่างๆหรือบริษัทที่ผลิตผลิตภัณฑ์จากยางผสมชนิดนี้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นความลับของบริษัท การศึกษาการเตรียมยางผสมคู่นี้ในเชิงวิชาการ ก็มีมาเป็นเวลานานและมีการศึกษากันมาอย่างต่อเนื่อง เช่นในเอกสารอ้างอิง[11-27] การผสมยางคู่นี้มักไม่มีปัญหามากนักในทางปฏิบัติ เพราะยางทั้งสองชนิดนี้เข้ากันได้ดีพอสมควร และสามารถวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ในเวลาเดียวกันได้ แต่การที่จะได้คุณสมบัติที่ดีที่สุดหลังจากวัลคาไนซ์แล้วนั้น จำเป็นต้องทราบเงื่อนไขการผสมและกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ถูกต้องสำหรับยางผสมนั้นๆ เนื่องจากยางผสมจะมีสารเคมีผสมอยู่เป็นจำนวนมาก สารเคมีที่ใช้ก็มีอยู่มากมายหลายชนิด และสูตรที่ใช้มีหลากหลายขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์หรือลักษณะการใช้งาน ดังนั้น งานวิจัยเกี่ยวกับยางผสมคู่นี้จึงมีความหลากหลาย การทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับยางผสมคู่นี้ไม่อยู่ในขอบเขตของรายงานฉบับนี้

การนำยางธรรมชาติผสมกับพอลิเมอร์ตระกูลโพลีโอเลฟิน มีขึ้นประมาทยี่สิบกว่าปีแล้ว ในปัจจุบันได้มีการผลิตเชิงพาณิชย์ทั้งในประเทศมาเลเซียและสหรัฐอเมริกา โดยทำการผสมโพลีโพรพิลีน(PP)กับยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสมคู่นี้ถูกเตรียมขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่เรียกว่า Thermoplastic Elastomer (TPE) เช่นเดียวกับการเตรียมTPEที่มีโพลีโพรพิลีนผสมกับยางอีพิตีเอ็ม(EPDM) ซึ่งให้คุณสมบัติที่ดีมาก แต่เมื่อนำยางธรรมชาติผสมกับโพลีโพรพิลีนหรือพลาสติกชนิดอื่นๆแล้ว จะเรียกพอลิเมอร์ผสมนี้ว่า Thermoplastic Natural Rubber (TPNR) [28-29] คุณสมบัติของTPNRขึ้นอยู่กับสัดส่วนของยางธรรมชาติและวิธีการผสม ถ้ามียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก จะจัดTPNRนี้เป็นชนิดนุ่ม(soft grade) ถ้ามีพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลักจะจัดเป็นชนิดแข็ง(hard grade) การทำให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนซ์ระหว่างการผสมยางกับพลาสติก หรือที่เรียกว่าเกิด dynamic vulcanization จะได้TPNRที่มีคุณสมบัติเด่นขึ้นกว่าเดิม การศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพลาสติกตระกูลโพลีโอเลฟินนี้มีอยู่พอสมควร [9,28-51] การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่PP พลาสติกตัวอื่นๆในตระกูลเดียวกันนี้ถูกนำมาศึกษาผสมกับยางธรรมชาติเช่นกัน เช่น โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (LLDPE) และ โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พบว่าโพลีเอทิลีนเหล่านี้ให้คุณสมบัติไม่ดีตามที่ต้องการ และจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเหลวช่วยในการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ได้มีการศึกษาทางธรรมชาติผสมกับอีลาสโตเมอร์อื่นๆ เช่น สไตรีน-เอทิลีนบิวทีน-สไตรีน (SEBS) [52] และเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) [53-59] จากการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติผสมกับSEBSไม่แสดงคุณสมบัติที่ดี SEBSมิได้ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของยางผสมดีขึ้น กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาทางธรรมชาติผสมกับEVAnั้นอยู่ในประเทศอินเดีย นักวิจัยกลุ่มนี้ระบุว่ายางผสมระหว่างNRและEVAnี้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้าและสายเคเบิล โดยยางผสมชนิดนี้จะแสดงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีของNR และแสดงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ(aging properties)ที่ดีของEVA จากการศึกษาพบว่ายางผสมจะมีความต้านทานต่อโอโซนสูงกว่ายางธรรมชาติ การวัลคาไนซ์EVAด้วยไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์(DCP)และการเติมcompatibilizer จะทำให้ได้ยางผสมที่มีคุณสมบัติดี

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการพยายามผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ต่างๆทั้งที่เป็นยางสังเคราะห์ อีลาสโตเมอร์ และพลาสติก เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นตามที่ต้องการ การศึกษาทางผสมที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบยังคงดำเนินต่อไป โครงการวิจัยที่กำลังศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เตรียมยางผสมชนิดใหม่ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ โดยเลือกใช้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ของตระกูลโพลิเอทิลีน คือ โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (ultra-low-density Polyethylene, ULDPE) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ ULDPEนี้สังเคราะห์โดยเทคนิคพิเศษที่เรียกว่า single-site INSITE metallocene catalyst technology ของบริษัทดาวน์เคมีคอลจำกัด ซึ่งมีการผลิตเชิงพาณิชย์ในราวต้นทศวรรษ 1990 [60-61] ULDPEนี้มีลักษณะเป็น Thermoplastic Elastomer สามารถวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ได้ และแสดงคุณสมบัติความต้านทานต่อโอโซนและแสงยูวี(UV)สูงกว่ายางธรรมชาติ คุณสมบัติต่างๆของULDPEที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้แสดงในตารางที่1.1 จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ คณะวิจัยคาดว่า การนำULDPEผสมกับยางธรรมชาติน่าจะให้คุณสมบัติที่ดี มีความต้านทานต่อโอโซน ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ หรืออย่างน้อยที่สุด ยางผสมชนิดใหม่นี้ (NR/ULDPE blend) น่าจะแสดงคุณสมบัติที่ใกล้เคียงยางผสมNR/SBR ซึ่งโครงการวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties)ของยางผสมทั้งสองชนิดนี้ โดยใช้คุณสมบัติการดึงยืด(Tensile properties)เป็นหลัก การทดสอบคุณสมบัติต่างๆใช้มาตรฐานASTMเป็นเอกสารอ้างอิง

โครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเบื้องต้นของการเตรียมยางผสมชนิดใหม่ที่ยังไม่มีการศึกษามาก่อน ยังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาต่อไปในระดับลุ่มลึกมากยิ่งขึ้น การทดสอบคุณสมบัติต่างๆต้องพึงพาอุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ ทำให้มีอาจทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพได้มากกว่าที่ทำอยู่ เช่น มีเครื่องมือชำรุดระหว่างการทำการวิจัย คือ เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน จึงไม่สามารถทดสอบคุณสมบัติได้ในโครงการนี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังคงดำเนินต่อไป คณะวิจัยยินดีรับฟังคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของผู้อ่าน อันจะยังประโยชน์ต่อการทำการวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. C. S. L. Baker, *Rubber World*, **202(6)**, 24 - 32 (1990).
2. A. A. S. A. Kadir, *Rub. Chem. Tech.*, **67**, 537 - 548 (1994).
3. C. S. L. Baker, *Prog. Rub. Plast. Techno.*, **13 (3)**, 203 - 229 (1997).
4. P. J. Corisn and B. D. W. Powell, *Rub. Chem. Tech.*, **47**, 481 - 510 (1974).
5. E. N. Kresge, *J. Appl. Polym. Sci.: Polym. Sympo.*, **39**, 37 - 57 (1984).
6. A. Y. Coran, *Rub. Chem. Tech.*, **61**, 281 - 292 (1988).
7. W. M. Hess, C. R. Herd and P. G. Vegvari, *Rub. Chem. Tech.*, **66**, 329 - 375 (1993).
8. L. White, *Euro. Rub. J.*, **January**, 26 - 27 (1994).
9. A. Ibrahim and M. Dahlan, *Prog. Polym. Sci.*, **23**, 665 - 706 (1998).
10. C. M. Roland in *Handbook of Elastomers: New Developments and Technology*, Marcell Dekker Inc., New York, 1988, pp 183 - 211.
11. R. S. Siddaramaiah and U. Premakumar, *Polymer*, **39**, 3929-3931 (1998).
12. J. T. Varkev, P. R. Chatterji, S. S. Rao and S. Thomas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **68**, 1473-1483 (1998).
13. A. K. Sircar, M. L. Galaska and R. P. Chartoff, *J. Therm. Anal.*, **49**, 407-415 (1997).
14. J. T. Varkev, P. R. Chatterji, S. S. Rao and S. Thomas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **62**, 2169-2180 (1996).
15. K. Naito, N. Wada, S. Inoue and T. Nishi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 755-762 (1996).
16. S. H. Chough, D. H. Chang, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 449-454 (1996).
17. J. T. Varkey, s. Thomas and S. S. Rao, *J. Appl. Polym. Sci.*, **56**, 451-460 (1995).
18. G. M. Nasr and A. S. Gomaa, *Polym. Degra. Stab.*, **50**, 249-259 (1995).
19. P. Thavamani, K. Dipak, K. Khastgir and A. K. Bhowmick, *Plast. Rub. Compo. Proc. Appl.*, **19**, 245-254 (1993).
20. P. Thavamani, A. K. Bhowmick and D. Khastgir, *Wear*, **170**, 25-32 (1993).
21. G. Mathew, N. M. Mathew and A. P. Kuriakose, *Polm. Plast. Techno. Eng.*, **32**, 439-455 (1993).
22. J. Yang, S. Kaliaguine and C. Rov, *Rub. Chem. Techno.*, **66**, 213-229 (1993).
23. M. A. Sidkey, A. M. A. E. Fattah and N. S. A. E. All, *J. Appl. Polym. Sci.*, **46**, 581-585 (1992).
24. H. H. Hassan, E. M. A. Bary, M. Amin, M. K. E. Mansy and M. E. Gouda, *J. Appl. Polym. Sci.*, **39**, 1903-1913 (1990).
25. G. R. Cotton and L. J. Murphy, *Rub. Chem. Techno.*, **61**, 609-618 (1988).

26. G. R. Hamed, *Rub. Chem. Techno.*, **61**, 548-553 (1988).
27. R. Joseph, K. E. George, D. J. Francis, *J. Appl. Polym. Sci.*, **35**, 1003-1017 (1988).
28. A. Y. Coran in *Handbook of Elastomers: New Developments and Technology*, Marcell Dekker Inc., New York, 1988, pp 249-310.
29. A. D. Roberts, *Natural Rubber Science and Technology*, Oxford University Press, New York, 1990, chapter 9.
30. M. D. Ellul, *Plast. Rub. Compo. Proc. Appl.*, **26**, 137-142 (1997).
31. A. Abdullah, S. Ahmad and C. S. Sulaiman, *J. Appl. Polym. Sci.*, **58**, 1125 -1133 (1995).
32. L. K. Yoon, C. H. Choi and B. K. Kim, *J. Appl. Polym. Sci.*, **56**, 239-246 (1995).
33. S. Ahmad, I. Abdullah, C. S. Sulaiman, S. Kohjiya and J. R. Yoon, *J. Appl. Polym. Sci.*, **51**, 1357-1363 (1994).
34. S. Norzalia, H. Hanim and M. Y. A. Fuad, *Plast. Rub. Compo. Proc. Appl.*, **22**, 185-193 (1994).
35. D. Roy, S. K. De and B. R. Gupta, *J. Mater. Sci.*, **29**, 4113-4118 (1994).
36. S. Norzalia, B. Surani and M. Y. A. Fuad, *J. Elasto. Plast.*, **26**, 183-204 (1994).
37. D. Roy, A. K. Bhattacharya and B. R. Gupta, *J. Elast. Plast.* **25**, 46-58 (1993).
38. C. Qin, J. Yin and B. Huang, *Polymer*, **31**, 663-667 (1990).
39. C. Qin, J. Yin and B. Huang, *Rub. Chem. Tech.*, **63**, 77-91, 1990.
40. J. Jacob, M. M. Mather and B. Kuriakose, *Rubber World.*, **202(5)**, 27-31 (1990).
41. A. J. Tinker, *Rubber World.*, **199(6)**, 25-28 (1989).
42. N. R. Choudhury and A. K. Bhowmick, *J. Appl. Polym. Sci.*, **38**, 1091-1109 (1989).
43. N. R. Choudhury, T. K. Chaki, A. Dutta and A. K. Bhowmick, *Polymer*, **30**, 2047-2053 (1989).
44. S. A. Malaika and E. J. Amir, *Polym. Degra. Stab.*, **26**, 31-41 (1989).
45. M. M. Sain, I. Hudec, J. Beniska and P. Rosner, *Rub. Chem. Tech.*, **61**, 747-759 (1988).
46. S. Akhtar, *Rub. Chem. Tech.*, **61**, 577-585 (1988).
47. N. R. Choudhury, A. K. Bhowmick, *J. Mater. Sci.*, **23**, 2187-2194 (1988).
48. M. S. Chuu, *J. Appl. Polym. Sci.*, **34**, 1447-1457 (1987).
49. S. Akhtar and S. S. Bhagawan, *Rub. Chem. Tech.*, **60**, 591-599 (1987).
50. B. Kuriakose and S. K. De, *J. Appl. Polym. Sci.*, **32**, 5509-5521 (1986).
51. S. Akhtar, P. P. De and S. K. De, *J. Appl. Polym. Sci.*, **32**, 4169-4183 (1986).
52. J. K. Kim, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 431-438 (1996).
53. P. Jansen, A. S. Gomes and B. G. Soares, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 591-598 (1996).

54. P. Jansen and B. G. Soares, *Polym. Degra. Stab.*, **52**, 95-99 (1996).
55. P. Jansen, M. Amorim, A. S. Gomes and B. G. Soares, *J. Appl. Polym. Sci.*, **58**, 101-107 (1995).
56. A. T. Koshy, B. Kuriakose, S. Thomas and S. Varghese, *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, **33**, 149-159 (1994).
57. A. T. Koshy, B. Kuriakose, S. Thomas and S. Varghese, *Polymer*, **34**, 3428-3436 (1993).
58. A. T. Koshy, B. Kuriakose, S. Thomas, C. K. Premalatha and S. Varghese, , *J. Appl. Polym. Sci.*, **49**, 901-912 (1993).
59. A. T. Koshy, B. Kuriakose, S. Thomas and S. Varghese, *Polym. Degra. Stab.*, **36**, 137-147 (1992).
60. L. White, *Euro. Rub. J.*, **March**, 16-17 (1994).
61. D. E. Turek and B. G. Landes, ANTEC'95, 2270-2274 (1995).

ตาราง 1.1 สมบัติทางกายภาพของ ULDPE ENGAGE[®] 8150 (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

Physical Properties	Test Method	Values
Density, gm/cc	ASTM D792	0.868
Mooney Viscosity, ML 1+4 @121°C	ASTM D	35
Octene Comonomer, %	Dow	25
Melt Index, dg/min	ASTM D1238	0.5
Melt Flow Ratio, I ₁₀ /I ₂	ASTM D792	7.7
Dow Rheology Index (DRI)	Dow	2
Ultimate Tensile, psi (MPa)	ASTM D638	1,600 (11)
100% Tensile Modulus, psi (MPa)	ASTM D638	400 (2.8)
Ultimate Elongation, %	ASTM D638	880
Hardness, Shore A	ASTM D2240	75
Brittleness Temperature, °C	ASTM D746	< -76

2. วัตถุดิบ สารเคมี และเครื่องมือ

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัสดุที่ใช้ในโครงการวิจัยได้แก่ ยางธรรมชาติ(ยางพารา)ชนิดยางแผ่นตากแห้ง(ยางดิบเกรด2) (air-dried sheet rubber) ผลิตจากสหกรณ์ชาวสวนยางตำบลบ้านพรุ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ยางเอสบีอาร์ (SBR petroFLEX[®]) ชนิดเกรดทั่วไปซึ่งประกอบด้วยสไตรีน 23.5% สังเคราะห์โดยวิธีอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (emulsion polymerization) ที่อุณหภูมิ 10 °ซ. โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (ULDPE ENGAGE[®] 8150) ที่ใช้มีความหนาแน่น 0.868 กรัม/ซม.³ ผลิตโดย บริษัท ดาวเคมีคอล จำกัด สมบัติทางกายภาพของULDPE(ENGAGE[®] 8150)สรุปในตารางที่1.1 NRและSBRถูกวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์และมีสารเคมีอื่นๆดังนี้ Vulkacit CZ[®] (CBS)เป็นสารเร่งปฏิกิริยา(accelerator) ใช้เพื่อเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางให้เร็วขึ้น ซิงค์ออกไซด์(ZnO)และกรดสเตียริก(stearic acid)เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา(activator) ใช้เพื่อให้สารตัวเร่งทำงานดีขึ้น Vulkanox PAN[®] เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์(antioxidant) ใช้เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของยางระหว่างการเตรียมยางผสมและระหว่างการใช้งาน วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ทุกชนิดเป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมยางผสม

1. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Yasuda Seiki[®] 191TM two-roll mill) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว และยาว 8 นิ้ว อัตราส่วนความเร็วรอบลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลังเท่ากับ 1:1.23
2. เครื่องอัด (Kao Tiech[®] compression mold)
3. เครื่องตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ (dumbbell) ซึ่งมีแม่แบบทำด้วยสแตนเลสและมีความคมที่สามารถตัดชิ้นยางให้มีรูปร่างตามแบบนั้นได้ การตัดชิ้นงานแบบนี้เรียกว่า die cut

2.3 วิธีการเตรียมยางคอมปาวด์¹

ยางธรรมชาติ

นวดยางNRให้นิ่มประมาณ3นาทีด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง โดยตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งหน้าประมาณ 70°ซ. และอุณหภูมิลูกกลิ้งหลังประมาณ 60°ซ. สารเคมีต่างๆจะถูกบดให้ละเอียดก่อนนำมาผสมกับยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง โดยโปรยอย่างต่อเนื่องลงบนยางที่อยู่บริเวณช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง และกระจายไปตลอดความยาวของลูกกลิ้ง ใส่สารเคมีตามลำดับดังต่อไปนี้ สารกระตุ้นปฏิกิริยา(ซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริกถูกบดผสมคลุกให้เข้ากันก่อน) สารแอนตี้ออกซิแดนท์ สารเร่งปฏิกิริยา และซัลเฟอร์ เมื่อใส่สารเคมีครบแล้วทำการบดยางคอมปาวด์นี้ต่อไป

¹ การเตรียมยางคอมปาวด์แต่ละครั้งใช้ยางหนัก 50 กรัม

อีก5นาทีก่อน เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์ไม่เกิน 25 นาที เก็บยางคอมปาวด์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่เกิน24ชั่วโมงก่อนนำไปวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัด ระหว่างการบดผสมจะปรับระยะห่างของลูกกลิ้งให้แคบที่สุดที่จะยังคงให้แผ่นชีท(sheet)หนาสม่ำเสมอ และมีการเปลี่ยนทิศทางของแผ่นชีทในการป้อนเข้าลูกกลิ้งทุกครั้ง คือ เมื่อได้แผ่นชีทออกมา จะพับแผ่นชีทตามทิศทางเครื่อง(machine direction, MD) ในการป้อนครั้งต่อไปจะป้อนทิศทางขวาง(transverse direction, TD)ของแผ่นชีทเข้าเครื่อง ดังนั้นTDของแผ่นชีทครั้งก่อนจะกลายเป็นMDของแผ่นชีทครั้งปัจจุบัน ดังแสดงในรูป2.1 การทำเช่นนี้ตลอดการใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง จะช่วยให้มีการผสมกระจายได้ดีมากขึ้น ลดปัญหาคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง

เครื่องอัดถูกตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 140°C. ขั้นตอนการวัลคาไนซ์มีดังนี้ ยางคอมปาวด์ถูกให้ความร้อนโดยใช้แรงอัดเล็กน้อย เพื่อให้ฝานบนและฝาล่างของเครื่องอัดประกบกัน(pre-heating)เป็นเวลา5นาที ใช้แรงอัดให้มีความดันเท่ากับ 600 กก/ซม.² เป็นเวลา25นาที ระหว่างนี้มีการปล่อยแรงอัดเพื่อขับไล่อากาศเป็นเวลาสองครั้ง เมื่อครบกำหนดเวลา เอาแผ่นยางออกจากเครื่องอัด ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปตัดเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ แผ่นยางที่ได้จากเครื่องอัดมีขนาด 12.5x12.5x0.1 ซม.³ หรือ 12.5x12.5x0.3 ซม.³

แผ่นยางที่มีความหนา 1 มม. จะถูกตัดด้วยแม่แบบที่มีรูปร่างตามเบลล์ เพื่อใช้เป็นชิ้นงานในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ยางเอสบีอาร์

ใช้วิธีการเช่นเดียวกับNRทุกประการ ยกเว้นไม่ต้องบดยางให้นิ่ม

ยางผสม

NRถูกบดให้นิ่มก่อนแล้วนำSBRหรือULDPEมาผสม การผสมยางทั้งสองให้เข้ากันได้ดีจะใช้เวลาไม่เกิน10นาทินับตั้งแต่เวลาเริ่มบดNR ขณะผสมยางทั้งสองเข้าด้วยกัน จะใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางของแผ่นชีท(MD-TD)ในการป้อนเข้าลูกกลิ้งตลอดเวลา เพื่อช่วยให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้ากว้างของลูกกลิ้ง ต่อจากนี้เติมสารเคมีและดำเนินการต่อไปตามวิธีการเดียวกันกับการเตรียมNRทุกประการ

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติและวิธีการทดสอบ

1. เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) รุ่นASTM-100 และ Moving Die Rheometer รุ่นMDR 2000 (Alpha Technologies) ใช้ตรวจสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางตามมาตรฐาน ASTM D2084 ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C. ชิ้นงานเป็นยางคอมปาวด์ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องหนึ่งคืนและไม่ได้วัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัด

2. เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่นOSK10162 (TOYOSIEKI) ใช้วัดความหนืดมูนนี่ตามมาตรฐานASTM D1646 ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C. ใช้โรเตอร์ใหญ่ (L) อุณหภูมิ

ยางให้ร้อนเป็นเวลา1นาที่ และโรเตอร์หมุนวัดความหนืดเป็นเวลา4นาที่ อ่านค่าความหนืดที่ได้จากเครื่องซึ่งมีหน่วยเป็น ML(1+4)@140 °C

3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่นSM-5800LV (JEOL) ใช้ศึกษามอร์โฟโลยีของยางผสม โดยศึกษาจากผิวหน้าของชิ้นงานที่ถูกทดสอบคุณสมบัติการดึงยึดแล้ว นำผิวหน้า(ระนาบ)ที่เกิดจากดึงจนขาดจุ่มในพาราไซลีน (p-xylene) เป็นเวลา1-5วัน ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา1วัน และอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา1วัน ชิ้นงานถูกฉาบด้วยทองคำก่อนดูด้วยเครื่องSEM ชิ้นงานที่ไม่ได้แช่พาราไซลีนถูกนำมาเปรียบเทียบด้วย

4. เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบดีเอสซี (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่นDSC7 (Perkin Elmers) ใช้ตรวจสอบพฤติกรรมการเป็นผลึกของULDPE ตรวจสอบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -20°C ถึง +100°C. ใช้อัตราการให้ความร้อนและอัตราการทำให้เย็นเท่ากับ 10°C./นาที่

5. เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์เอ (Hardness Shore A tester) รุ่น3100 (ZWICK) ใช้วัดความแข็งตามมาตรฐานASTM D2240 ชิ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบห้าตำแหน่งแล้วหาค่าเฉลี่ย

6. เครื่องทดสอบการกระดอน รุ่นSRI (Resiliometer Shore Instrument & MFG. Co.) ใช้ทดสอบการกระดอนตัว (Resilience, vertical rebound) ตามมาตรฐานASTM D2632 ชิ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ค่าการกระดอนวัดจากสเกล(ความสูง)ของลูกตุ้มที่กระดอนขึ้นมา ทดสอบสามครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

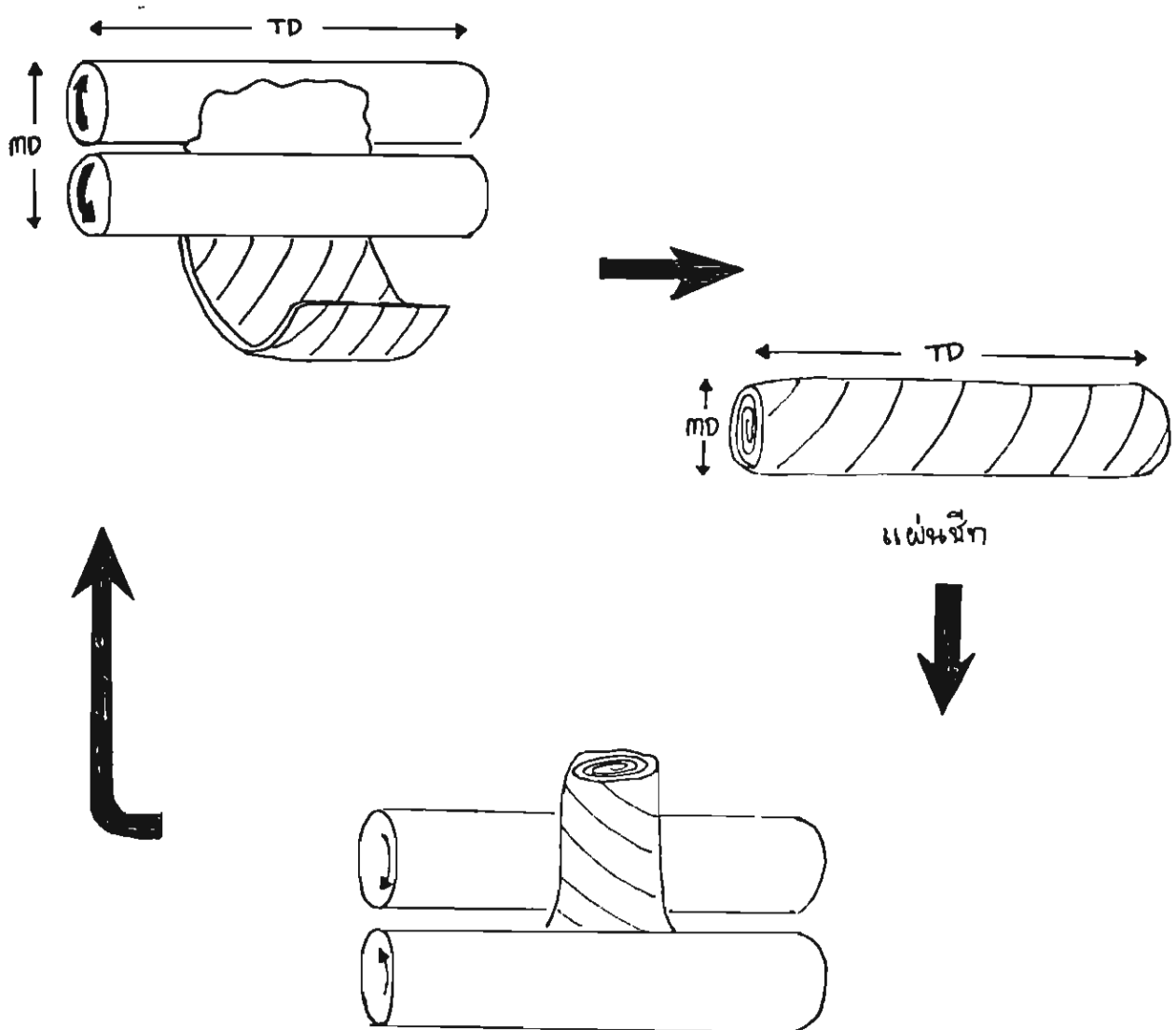
7. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) รุ่น5131 (TABER) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3389 ชิ้นงานหนา 3 มม. มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 115 มม. ใช้หินขัดเบอร์10 (อย่างละเอียด) น้ำหนัก 1,000 กรัม วางลงบนชิ้นงานที่หมุนรอบด้วยความเร็ว 60 รอบ/นาที่ ชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบและน้ำหนักหลังจากทดสอบไป3,000รอบ น้ำหนักที่หายไปเป็นตัวบ่งชี้ความต้านทานต่อการขัดถู ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบสองครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

8. เครื่องทดสอบคุณสมบัติการดึงยึด (Tensile testing machine) รุ่น 1000S (LLOYD) ใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึด (Tensile properties) ตามมาตรฐานASTM D412(die C) ใช้ทดสอบความต้านทานต่อการฉีก (Tear resistance) ตามมาตรฐานASTM D624(die C) และใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึดหลังการอบด้วยความร้อนและออกซิเจน(Aging resistance) ตามมาตรฐานASTM D572 การทดสอบทุกชนิดกระทำที่อุณหภูมิห้อง ใช้ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 500 มม./นาที่ ไม่มีการใช้extensometer การคำนวณใช้ความยาวก่อนยืด (L₀) เท่ากับ 65 มม. ซึ่งเป็นระยะระหว่างหัวจับชิ้นงาน (grip) ชิ้นงานหนา 1 มม. ถูกตัดเป็นรูปร่างตามที่กำหนดในมาตรฐานนั้นๆด้วยเทคนิคที่เรียกว่า die cut ทดสอบ5-8ชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่างแล้วหาค่าเฉลี่ย

9. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เมื่อได้รับความร้อนและออกซิเจน (Aging resistance) รุ่น gphh-200 (Tabai Geer Oven) ทดสอบตามมาตรฐานASTM D572 ทดสอบที่

อุณหภูมิ 70°ซ. เป็นเวลา 7 วัน ชิ้นงานถูกแขวนอยู่ในตู้อบ โดยหมუნอยู่ภายในตู้อบตลอดเวลา มีการหมუნเวียนไปเรื่อยๆของอากาศจากภายนอกมาทำให้ร้อนผ่านชิ้นงานที่แขวนอยู่แล้วถ่ายเทออกไปภายนอกตู้อบ ทดสอบ4-8ชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่าง เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองนี้ชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติการดึงยึดต่อไป

10. เครื่องทดสอบความต้านทานการหักงอ (Flex cracking resistance) รุ่นDe Mattia Flexing Machine ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D813 ชิ้นงานเตรียมโดยการวัลคาไนซ์ในแม่แบบโดยตรงเพื่อให้ได้รูปร่างตามมาตรฐาน ทำการทดสอบด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที หยุดเครื่องเพื่อตรวจดูรอยแตกเป็นระยะๆโดยใช้แว่นขยายตรวจดู บันทึกจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยแตกและลักษณะของรอยแตก ทดสอบสามชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่างและทดสอบที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบนี้เทียบได้กับมาตรฐาน BS903:Part A10



รูป 2.1 ภาพวาดแสดงการเตรียมยาง(ผสม)คอมปาวด์ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง

3. การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดสูตร

3.1 การทดลองที่ 1 : การหาสูตรที่เหมาะสม

3.1.1 วัตถุประสงค์

เนื่องจากยางที่ใช้มีทั้งยางธรรมชาติ(NR)และยางสังเคราะห์(SBR) ปริมาณสารเคมีที่ใช้และสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมจึงแตกต่างกัน แต่เมื่อนำยางทั้งสองชนิดมาผสมกันจำเป็นต้องใช้ปริมาณสารเคมีและสภาวะการขึ้นรูปที่ดีที่สุด และต้องการใช้สูตรคอมปาวด์เพียงสูตรเดียวสำหรับยางผสมทุกชนิด ดังนั้นจึงกำหนดการทดลองเบื้องต้นโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเคมีบางตัวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องอัด ใช้ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึด(tensile properties) เป็นดัชนีชี้วัดความเหมาะสมของสูตร

3.1.2 วิธีการทดลอง

ยางคอมปาวด์ของยางผสมNR/SBRและยางผสมNR/ULDPEที่มีอัตราส่วน50/50 ยางNRและยางSBR เตรียมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งตามวิธีการที่อธิบายในบทที่2(หัวข้อการเตรียมยางคอมปาวด์) แต่มีข้อแตกต่างเล็กน้อย คือ ใช้ความดัน 300 กก./ซม.² และทำการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัดภายในวันเดียวกันกับที่เตรียมยางคอมปาวด์ อักษรย่อที่ใช้แทนยางผสมแต่ละชนิดแสดงในตารางที่3.1 และใช้อักษรย่อนี้ตลอดการวิจัย สูตรที่ใช้ทดลองมี3สูตรดังแสดงในตารางที่3.2 ทั้งสามสูตรใช้เวลาในการวัลคาไนซ์30นาที สารเคมีที่ใช้คิดตามน้ำหนักของNRและSBRเท่านั้น เพราะULDPEไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ได้

แผ่นซีทULDPEหนา1มม. เตรียมโดยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิ140°C. เม็ดULDPEถูกให้ความร้อนเป็นเวลา10นาทีก่อนที่จะมีการอัดความดันไปที่ 600 กก./ซม.² ULDPEถูกหลอมภายใต้ความดันนี้เป็นเวลา10นาที ระหว่างนี้มีการลดความดันเป็นศูนย์ทุกๆ2นาทีเพื่อขับไล่อากาศ จากนั้นปล่อยให้ULDPEอยู่ภายใต้ความดันนี้ต่อไปอีก5นาที ปิดเครื่องให้ความร้อนและเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องอัดเป็นเวลา15นาที แกะแผ่นซีทออกจากแม่แบบ

ชิ้นงานรูปดัมเบลล์เตรียมโดยวิธี die cut และมีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D412 (die C) นำมาทดสอบคุณสมบัติการดึงยึดโดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มม./นาที (ดูรายละเอียดในหัวข้อ2.4-ข้อ8)

3.1.3 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบคุณสมบัติดึงยึดสรุปในตารางที่3.3 ถึงแม้ว่ารูปร่างของชิ้นดัมเบลล์มีความยาวเกจ(gauge length, L_0)เท่ากับ35มม. แต่เนื่องจากเครื่องทดสอบไม่มีextensometer ดังนั้นการคำนวณที่ใช้ความยาวเกจเป็น35มม. จะให้ค่าที่ผิดไปจากความเป็นจริง เพราะบริเวณที่อยู่เหนือระยะเกจถูกดึงยึดไปด้วย ฉะนั้นจึงควรใช้ระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน (grip) เป็นความยาวเกจใน

การคำนวณ ในตารางที่3.3ได้เปรียบเทียบค่าระยะยืดเมื่อขาดที่ใช้ L_0 ต่างกัน การคำนวณครั้งต่อไปจะใช้ L_0 เท่ากับ65มม. นอกเหนือจากนี้จะระบุค่า L_0

NRแสดงความแข็งแรงมากที่สุดในสูตรที่1และความแข็งแรงลดลงตามลำดับในสูตรที่2และสูตรที่3 สูตรที่1ให้ระยะยืด(elongation at break)น้อยที่สุด ส่วนสูตรที่2ให้ระยะยืดมากที่สุด แสดงว่าสูตรที่2ให้ค่าคุณสมบัติระหว่างสูตรที่1และสูตรที่3 SBRแสดงความแข็งแรงที่จุดขาด(tensile strength)และระยะยืดที่ขาดมากที่สุดในสูตรที่2 แต่ค่าโมดูลัสที่300%มากที่สุดในสูตรที่3 ยางผสมB3(50/50 NR/SBR) แสดงความแข็งแรงมากที่สุดในสูตรที่1และระยะยืดที่ขาดมากที่สุดในสูตรที่2 ยางผสมB6(50/50 NR/ULDPE) แสดงความแข็งแรงมากที่สุดในสูตรที่2และระยะยืดที่ขาดน้อยที่สุดในสูตรที่2 แต่ระยะยืดที่จุดขาดทั้งสามสูตรของ ULDPEมีค่าใกล้เคียงกัน

ค่าคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากการทดลองถูกเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี "กฎของการผสม" (Rule of Mixture) ดังนี้

$$P = w_1P_1 + w_2P_2$$

เมื่อ P คือคุณสมบัติของยางผสม

P_1 คือคุณสมบัติของNRที่ได้จากการทดสอบ

P_2 คือคุณสมบัติของSBRหรือULDPEที่ได้จากการทดสอบ

w_1 คืออัตราส่วนของน้ำหนักของNRที่มีอยู่ในยางผสม

w_2 คืออัตราส่วนของน้ำหนักของSBRหรือULDPEที่มีอยู่ในยางผสม

จากการเปรียบเทียบสูตรทั้งสามระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้วค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าความแข็งแรงที่จุดขาดของยางผสมทั้งสองชนิดในสูตรที่สองที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าสูตรอื่นๆ

NR SBR และULDPE ถูกดึงยืดได้มากกว่า 250 มม. NRและSBRมีการยืดของชิ้นงานแบบถาวรน้อยมากเมื่อถูกดึงจนขาด และมีการหดกลับ(Recovery)มาที่เดิมได้เมื่อปล่อยแรง(ในขณะขาด)เกือบ100% ULDPEแสดงการเปลี่ยนแปลงแบบถาวรมากกว่ามาก คือ มีลักษณะย่นตามหน้ากว้างของชิ้นงาน(ทิศทางตั้งฉากแรงดึง)และขุ่นเล็กน้อยตลอดความยาวของชิ้นงานที่ยืดออกไป ระยะเกยยืดออกไปมากกว่าสองเท่าเมื่อถูกดึงจนขาด แต่ยังคงแสดงลักษณะการหดตัวกลับ(Recovery)ได้ถึง72%

3.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

การพิจารณาสูตรที่เหมาะสมใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึดเป็นดัชนีชี้วัด เนื่องมาจากการที่ULDPEไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ได้และมียางผสมบางตัวมีสัดส่วนถึง50%(B6) วิธีการนี้ค่อนข้างจะแตกต่างกับการใช้ทั่วไป ถ้าพิจารณาผลการทดลองโดยไม่มีการเปรียบเทียบค่าที่

ได้จากการคำนวณ จะมีการก้ำกึ่งกันระหว่างสูตรที่1และสูตรที่2ในกรณีที่พิจารณาคูณสมบัติของยางผสม แต่ถ้าเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี สูตรที่2ของยางผสมทั้งสองชนิดจะมีความแข็งแรงที่จุดขาดสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าสูตรอื่นๆ และค่าคุณสมบัติที่เหลือก็สูงกว่าค่าที่คำนวณได้ จึงสรุปว่าสูตรที่2นี้ (กรดสเตียริก 2phr, วัลคาไนซ์ที่ 140°C) ให้คุณสมบัติยางผสมดีที่สุด เป็นที่น่าสังเกตว่ายางผสมทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็น compatible blend เนื่องจากแสดงคุณสมบัติเบี่ยงเบนไปทางบวก(positive deviation) จากค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีการผสมดังกล่าว นอกจากนี้การเตรียมยางผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งโดยเทคนิคที่ใช้นี้ ให้ผลดีในแง่การกระจายของส่วนผสมทั้งที่เป็นยางและสารเคมี เพราะค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สูตรที่2นี้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลวที่มีต่อคุณสมบัติดึงยึดของยางผสม(หัวข้อถัดไป) และใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่างๆของยางผสม(บทที่4) ภายหลังมีการปรับปรุงสูตรเพื่อความเหมาะสมต่อการทดสอบบางอย่าง(บทที่5)

NRและSBRแสดงความยืดหยุ่นแบบยาง(rubber elasticity)เช่นเดียวกับยางทั่วไปได้สมบูรณ์ เนื่องจากถูกวัลคาไนซ์แล้ว ในขณะที่ULDPEแสดงพฤติกรรมเช่นนี้ได้ไม่สมบูรณ์ อาจเนื่องจากการไม่มีการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล(cross-linking) การย่นที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการที่ULDPEพยายามแสดงการหดกลับ แต่ไม่สามารถกระทำได้อย่างเต็มที่ ส่วนความขุ่นนั้นอาจเกิดเป็นผลึกหรือเกิดช่องว่าง(โพรง)ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลจากการถูกแรงกระทำ การผสมระหว่างNRและULDPEนั้น สามารถเตรียมยางผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยการสังเกตด้วยตาในระหว่างการผสม และค่าความเบี่ยงเบนจากคุณสมบัติที่วัดได้

จากการทดลองสรุปได้ว่า สูตรที่2เหมาะสมมากที่สุดในการเตรียมยางผสม ULDPEมีลักษณะยืดหยุ่นใกล้เคียงอีลาสโตเมอร์พอลิเมอร์ และสามารถผสมได้ดีกับยางธรรมชาติ

3.2 การทดลองที่2 : การเตรียมยางธรรมชาติเหลว

3.2.1 วัตถุประสงค์

สังเคราะห์ยางธรรมชาติเหลวเพื่อใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ดี (compatibilizer) ระหว่างNRและULDPE

3.2.2 วิธีการทดลอง

วิธีการที่ใช้เป็นวิธีการที่ได้รับคำแนะนำจาก Dr. Gan Seng Neon โดยเตรียมจากน้ำยางชั้น(DRC60%) ชนิดที่มีแอมโมเนียปริมาณสูง มีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1.นำน้ำยางชั้นมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น ให้ได้น้ำยางชั้น 30% ปริมาตร 65 มิลลิลิตร
- 2.เติม 10% Vulcastab LW ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ(nonionic surfactant solution) ปริมาตร 6.5 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากัน
- 3.ค่อยๆหยดสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์เข้มข้น 0.5 M จนกระทั่งของผสมมี pH 6 (ใช้ประมาณ 25 มิลลิลิตร)
- 4.ค่อยๆเติมโซเดียมไนไตร 1 กรัม โดยทำการกวนตลอดเวลา
- 5.หยดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช้าๆที่ละหยด ปริมาตร 3 มิลลิลิตร
- 6.เติมน้ำกลั่นเพื่อให้ของผสมมีปริมาตรทั้งหมด 150 มิลลิลิตร ปิดฝาขวด นำไปวางบนเครื่องให้ความร้อนพร้อมกวนของผสมตลอดเวลา อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 30°C, 40°C และ 50°C.
- 7.ปิเปตของผสมในข้อ6 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทุกๆ1ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง
- 8.นำส่วนที่ปิเปตจากข้อ7ตกตะกอนด้วยเมทานอลอย่างช้าๆ จะได้ตะกอนของยางธรรมชาติเหลวออกมา
- 9.นำยางธรรมชาติเหลวที่เตรียมได้มากรองโดยวิธีลดความดัน นำสารที่กรองได้วางทิ้งไว้1คืน แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ
- 10.นำยางธรรมชาติเหลวที่ได้ชั่งน้ำหนัก และวัดความหนืด(intrinsic viscosity) ด้วย Ubbelohde viscometer ใช้ไทลูอินเป็นตัวทำละลาย ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องที่ความเข้มข้นต่างๆ (ไม่เกิน 1 %w/v) วัดเวลาที่ใช้ในการไหลของสารละลายและตัวทำละลายเมื่อผ่านระยะทางที่กำหนดไว้สามครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ ทำการวัดความหนืดสองครั้ง

3.2.3 ผลการทดลอง

ยางธรรมชาติเหลวจะมีลักษณะเหลวมากขึ้นตามลำดับ เมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง(ข้อ6)เพิ่มขึ้น การเตรียมที่อุณหภูมิ30°C. ในเวลา1ชั่วโมง จะได้ยางธรรมชาติเหลวมีลักษณะเหนียวติดมือ การเตรียมที่อุณหภูมิ50°C. ในเวลา5ชั่วโมง จะได้ยางธรรมชาติเหลวมีลักษณะเหนียวข้นติดภาชนะ ยางธรรมชาติเหลวที่เตรียมได้มีสีเหลืองอมส้มและใส แต่เมื่อนำไปอบ

ในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 35°C. เป็นเวลา 1 วัน จะมีลักษณะขุ่นขาวในบางส่วน ยางธรรมชาติ เหลวที่เตรียมได้ทั้งหมดไม่สามารถเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มโดยวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดและโดยการ ระเหยของตัวทำละลาย

ค่าความหนืดของสารละลาย (intrinsic viscosity, IV) คำนวณได้จาก reduced viscosity หรือ inherent viscosity ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Relative viscosity } (\eta_{\text{rel}}) &= t / t_0 \\ \text{Specific viscosity } (\eta_{\text{sp}}) &= \eta_{\text{rel}} - 1 \\ \text{Reduced viscosity } (\eta_{\text{red}}) &= \eta_{\text{sp}} / c \\ \text{Inherent viscosity } (\eta_{\text{inh}}) &= \ln (\eta_{\text{rel}}) / c \\ \text{Intrinsic viscosity } [\eta] &= (\eta_{\text{red}})_{c=0} = [\ln (\eta_{\text{rel}}) / c]_{c=0} \end{aligned}$$

เมื่อ t คือเวลาที่สารละลายยางธรรมชาติเหลวในโหลอื่นไหล

t_0 คือเวลาที่โหลอื่นไหล

c คือความเข้มข้นของสารละลายยางธรรมชาติเหลวในโหลอื่น

ตารางที่ 3.4 และ 3.5 แสดงค่า IV ที่วัดจากค่า reduced viscosity และจากค่า inherent viscosity ของยางธรรมชาติเหลวตามลำดับ ค่า IV ลดลงเมื่อใช้เวลานานขึ้น ในสามชั่วโมงแรก ค่า IV ของทั้งสามอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน ในชั่วโมงที่ 5 ค่า IV ที่ 50°C. ลดต่ำมากที่สุด อัตราการลดลงของค่า IV ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เตรียม อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการลดลงเร็วขึ้น

3.2.4 วิจารณ์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

การที่ยางธรรมชาติเหลวมีลักษณะเหนียวติดมือและติดภาชนะนั้น เป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในแง่ความสะดวกต่อการบวนการผสมและการแปรรูป ค่า IV ใช้เป็นค่าเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ค่า IV ลดลงหมายถึงน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามที่คาดหมายไว้ คือ น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงเมื่อใช้เวลานานขึ้นและหรือใช้อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการสลายตัวด้วยความร้อน ความแตกต่างของการทดลองทั้งสองครั้งเป็นความผิดพลาดทั่วไปของการทดลอง การตรวจสอบค่า IV ทำเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุลเท่านั้น มิได้ให้ความสำคัญกับค่านี้มากนัก

3.3 การทดลองที่3 : การศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลวต่อคุณสมบัติการดึงยึด

3.3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลวที่มีต่อกระบวนการผสมและคุณสมบัติการดึงยึดของยางผสมNR/ULDPE

3.3.2 วิธีการทดลอง

1. เตรียมยางผสมB4(70/30 NR/ULDPE) และNR โดยใช้สูตรที่2 (ดูตารางที่3.2)
2. เลือกใช้ยางธรรมชาติเหลวที่มีลักษณะไม่นิ่มจนเกินไป เพื่อสะดวกต่อการผสม คือ ตัวที่เตรียมในเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30°ซ. (LNR1) และ 40°ซ. (LNR2) ผสมลงไป ในNRและB4 โดยผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันกับNRเสียก่อน แล้วจึงเติมสารเคมีต่าง ๆ(สูตรที่2) หรือผสมNRกับLNRให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อน แล้วจึงผสมULDPEและสารเคมีลงไปตามวิธีการเตรียมยางคอมปาวด์ (หัวข้อ2.3)
3. ทดสอบคุณสมบัติการดึงยึด (ดูหัวข้อ2.4-ข้อ8)

3.3.3 ผลการทดลอง

เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติเหลวที่เหนียวเหนอะหนะ เพราะมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงมาก ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ คือ เหนียวติดภาชนะจนแกะออกไม่หมด หรือเหนียวติดลูกกลิ้งของเครื่องผสม ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติเหลวที่สังเคราะห์ขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง เพื่อให้สะดวกต่อการผสม ถึงกระนั้นก็ตาม ทั้งLNR1และLNR2ก็ยังคงสร้างปัญหาในกระบวนการผสม คือเหนียวติดลูกกลิ้งและไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับNR ต้องใช้เวลาในการผสมยางให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันนานขึ้นกว่าเดิม และทำให้กระบวนการผสมมีความยุ่งยากมากขึ้น ผลการทดสอบคุณสมบัติการดึงยึดแสดงในตารางที่3.6 และในรูปที่3.1-รูปที่3.6 ค่าความแข็งแรงเมื่อขาดมีแนวโน้มลดลง แต่ระยะยึดที่จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเติมในปริมาณที่ต่ำกว่า 15% ยังแสดงพฤติกรรมใกล้เคียงกับยางผสมที่ไม่มีการเติมLNR (รูปที่3.1และรูปที่3.2) เมื่อเติม 15% - 20% เส้นกราฟนี้เริ่มเบี่ยงเบนออกไปอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่3.3และรูปที่3.4) แสดงว่าความแข็งแรงลดลง LNR1ทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงลดลง และลดลงตามปริมาณที่เติม (รูปที่3.5) LNR2ทำให้ยางผสมแข็งแรงน้อยลงเมื่อมีปริมาณ15 - 20% (รูปที่3.6)

3.3.4 วิจารณ์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

การนำยางธรรมชาติเหลวมาผสม จำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณสารเคมีที่ใช้ว่าควรจะรวมน้ำหนักของยางธรรมชาติเหลวด้วยหรือไม่ การรวมน้ำหนักเข้าไปด้วยจะทำให้ใช้สารเคมีมากขึ้น ปริมาณของซิลเฟอร์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบโดยตรงกับคุณสมบัติ อาจทำให้การเปรียบเทียบผิดไป เนื่องจากต้องการใช้ยางธรรมชาติเหลวเป็นcompatibilizerเท่านั้น มิได้ต้องการเพิ่มเนื้อยางให้มากขึ้น ดังนั้น จึงไม่นำน้ำหนักของยางธรรมชาติเหลวในการคิดปริมาณการใช้สารเคมี นอกจากนี้

คุณสมบัติความเป็นยางของยางธรรมชาติเหลวก็น้อยลงไป เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดให้สั้นลง และพันธะคู่ถูกทำลายไประหว่างการทำปฏิกิริยา ฉะนั้นซัลเฟอร์ที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของNR มีส่วนน้อยหรือไม่มีเลยที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเหลว

การเติมยางธรรมชาติเหลวมิได้ทำให้ยางผสมNR/ULDPEแข็งแรงขึ้น ถึงแม้จะทำให้ดึงยืดได้มากขึ้นก่อนการขาด แต่คุณสมบัติโดยรวมมิได้ดีขึ้น มิได้ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างNRและULDPEให้ดีขึ้น (ยางผสมNR/ULDPEเป็น compatible blend) และยังทำให้กระบวนการผสมยุ่งยากมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว สรุปได้ว่ายางผสมNR/ULDPEไม่ต้องอาศัยยางธรรมชาติเหลวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ยางธรรมชาติเหลวไม่ได้เป็นcompatibilizerให้กับยางผสมNR/ULDPE ต่างจากยางผสมNR/HDPE¹และยางผสมNR/LLDPE¹ ที่คณะวิจัยระบุว่ายางธรรมชาติเหลวช่วยเพิ่มการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม และทำให้คุณสมบัติดึงยืดของยางผสมดีขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากHDPEและLLDPEมีลักษณะเป็นพลาสติก ส่วนULDPEมีลักษณะเป็นอีลาสโตเมอร์มากกว่า ทำให้ULDPEมีความเหมือนกับNRมากกว่า ULDPEจึงเข้ากันกับNRได้ดีกว่าHDPEและLLDPE ดังนั้นการวิจัยนี้จึงไม่มีการเติมยางธรรมชาติเหลวหรือcompatibilizerใด ๆ ลงในยางผสมNR/ULDPE

¹ [1] S. Ahmed et al., *J. Appl. Polym. Sci.*, 51 (1994) 1357-1363.

[2] A. Abdullah et al., *J. Appl. Polym. Sci.*, 58 (1995) 1125-1133.

ตารางที่ 3.1 อักษรย่อแทนยางผสมแต่ละชนิด

ชื่อย่อ	NR (wt%)	SBR (wt%)	ULDPE (wt%)
B1	70	30	-
B2	60	40	-
B3	50	50	-
B4	70	-	30
B5	60	-	40
B6	50	-	50

ตารางที่ 3.2 สูตรคอมปาวด์เบื้องต้น

สูตรที่	ZnO (phr)	Stearic acid (phr)	PAN (phr)	CBS (phr)	S (phr)	Curing Temperature (°C)
1	5	1	1	0.8	2	130
2	5	2	1	0.8	2	140
3	5	2	1	0.8	2	150

phr = per hundred rubber

ตารางที่3.3 คุณสมบัติการดึงยึด (Tensile properties) ของNR SBR ULDPE ขางผสมNR/SBR และขางผสมNR/ULDPEที่เตรียมจากสูตรที่1-สูตรที่3

Sample	Tensile Strength (MPa)	Modulus @ 300% ¹ (MPa)	Elongation at break (%)	
			L ₀ = 35 mm	L ₀ = 65 mm
NR				
สูตรที่1	24.61 ± 3.17 ³	1.54 ± 0.07	1350 ± 145	727 ± 72
สูตรที่2	18.18 ± 1.80	0.94 ± 0.05	1750 ± 48	942 ± 24
สูตรที่3	14.92 ± 3.45	0.80 ± 0.13	1667 ± 81	898 ± 40
SBR				
สูตรที่1	1.94 ± 0.06	0.93 ± 0.07	719 ± 40	387 ± 20
สูตรที่2	2.42 ± 0.27	0.77 ± 0.26	1055 ± 285	568 ± 140
สูตรที่3	2.36 ± 0.28	1.15 ± 0.08	686 ± 84	369 ± 42
ULDPE	10.27 ± 0.22	2.60 ± 0.04	1456 ± 19	784 ± 10
B3				
สูตรที่1	13.29 ± 2.50	1.44 ± 0.18	1269 ± 197	683 ± 90
สูตรที่2	13.01 ± 2.50	0.98 ± 0.02	1529 ± 33	823 ± 14
สูตรที่3	8.71 ± 3.52	1.14 ± 0.15	1197 ± 104	645 ± 53
B6				
สูตรที่1	16.60 ± 1.70	1.71 ± 0.14	1678 ± 23	904 ± 12
สูตรที่2	17.82 ± 2.80	1.72 ± 0.02	1629 ± 22	877 ± 11
สูตรที่3	14.12 ± 2.73	1.66 ± 0.12	1638 ± 53	882 ± 57
ค่าที่ได้จากการคำนวณ				
B3				
สูตรที่1	13.28	1.24	1035	557
สูตรที่2	10.30	0.86	1400	755
สูตรที่3	8.64	0.98	1177	634
B6				
สูตรที่1	17.44	2.07	1403	756
สูตรที่2	14.23	1.77	1603	863
สูตรที่3	12.60	1.70	1608	841

¹ ใช้ L₀ เท่ากับ 35 มม. ในการคำนวณ

ตารางที่3.4 ค่าIntrinsic viscosity¹ (IV) ของยางธรรมชาติเหลวที่คำนวณได้จากค่า Reduced viscosity

Reaction time ² (h)	30°C ³		40°C		50°C	
	test 1	test 2	test 1	test 2	test 1	test 2
1	1.06	1.45	1.50	1.17	1.57	1.24
2	1.07	1.39	1.10	0.94	1.28	1.18
3	0.94	1.02	0.91	1.07	0.91	0.90
4	0.75	0.88	0.84	0.92	0.66	0.86
5	0.71	0.86	0.71	0.87	0.49	0.64

¹ หน่วย dl/g

² เวลาในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

³ อุณหภูมิในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

ตารางที่3.5 ค่าIntrinsic viscosity¹ (IV) ของยางธรรมชาติเหลวที่คำนวณได้จากค่า Inherent viscosity

Reaction time ² (h)	30°C ³		40°C		50°C	
	test 1	test 2	test 1	test 2	test 1	test 2
1	1.17	1.46	1.60	1.43	1.64	1.53
2	1.11	1.36	1.08	1.12	1.30	1.32
3	1.01	1.06	0.91	1.12	0.92	0.98
4	0.82	0.90	0.84	0.91	0.68	0.90
5	0.77	0.87	0.75	0.87	0.52	0.69

¹ หน่วย dl/g

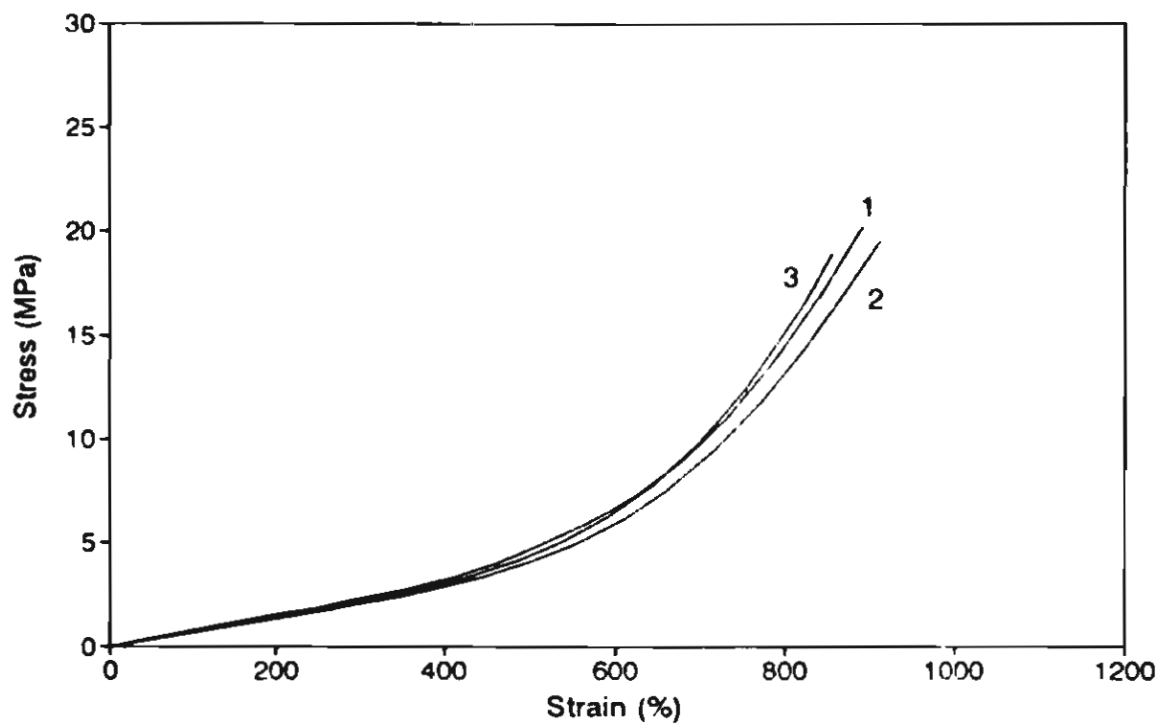
² เวลาในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

³ อุณหภูมิในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติดึงยึด(Tensile properties)ของNRและยางผสมNR/ULDPEที่มียางธรรมชาติเหลวประกอบ

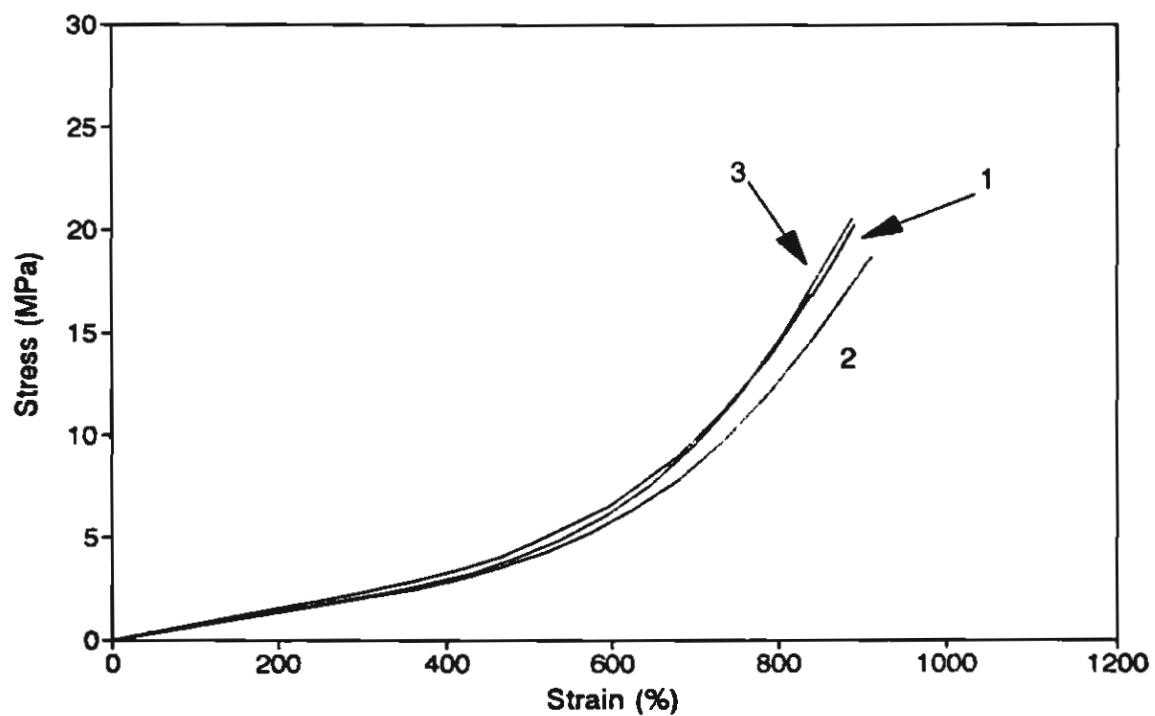
Material	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
NR	21.00 ± 2.31	889 ± 33
NR + LNR1 (70:5) ¹	21.80 ± 1.96	885 ± 22
NR + LNR1 (70:20)	16.63 ± 4.48	954 ± 68
NR + ULDPE (70:30)	22.72 ± 1.21	972 ± 25
NR + ULDPE + LNR1 (70:30:5)	18.96 ± 1.17	852 ± 20
NR + ULDPE + LNR1 (70:30:10)	20.59 ± 1.46	902 ± 10
NR + ULDPE + LNR1 (70:30:15)	17.55 ± 0.76	928 ± 45
NR + ULDPE + LNR1 (70:30:20)	17.10 ± 1.04	927 ± 29
NR + ULDPE + LNR2 (70:30:5)	18.99 ± 1.54	903 ± 30
NR + ULDPE + LNR2 (70:30:10)	18.69 ± 0.89	896 ± 34
NR + ULDPE + LNR2 (70:30:15)	19.39 ± 0.58	996 ± 50
NR + ULDPE + LNR2 (70:30:20)	18.46 ± 1.39	1010 ± 33

¹ อัตราส่วนโดยน้ำหนัก

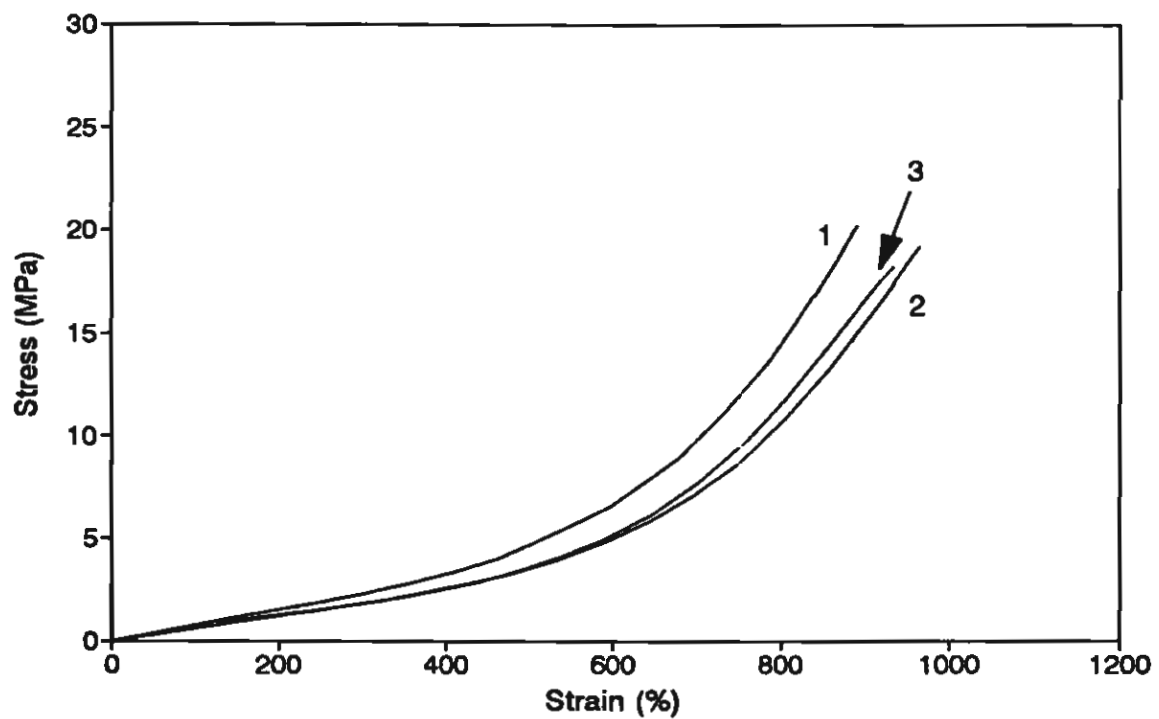


รูปที่ 3.1

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 5%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 5%

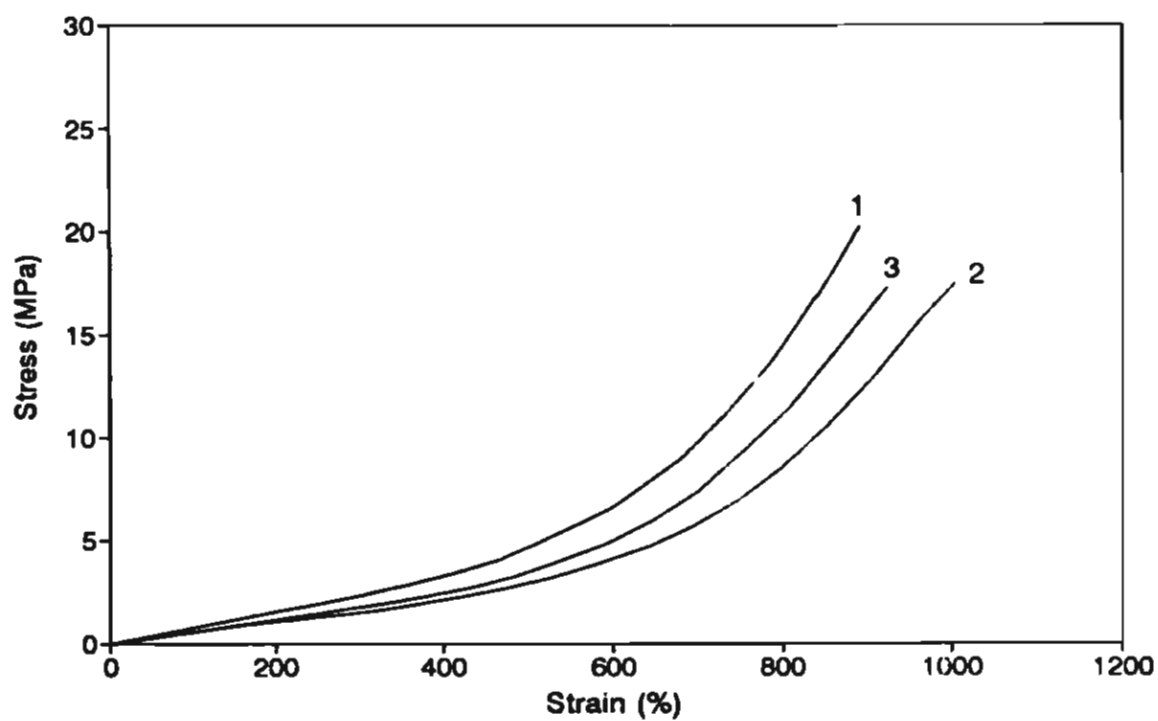


รูปที่3.2 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 10%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 10%



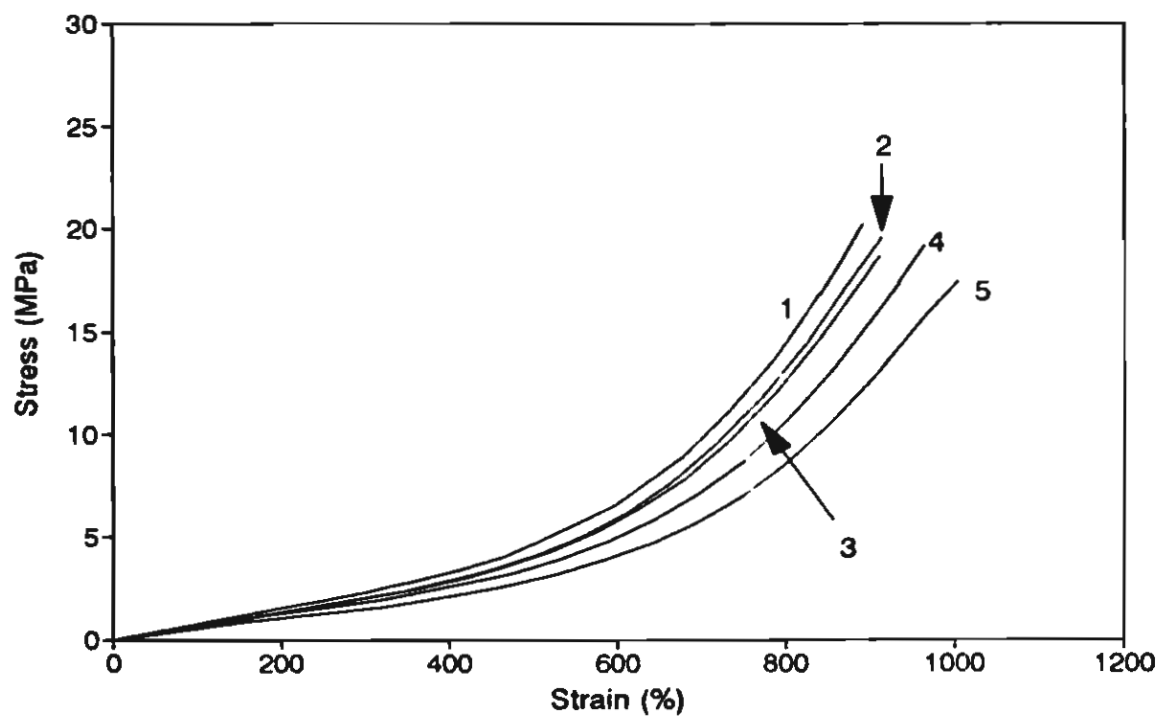
รูปที่ 3.3

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 15%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 15%



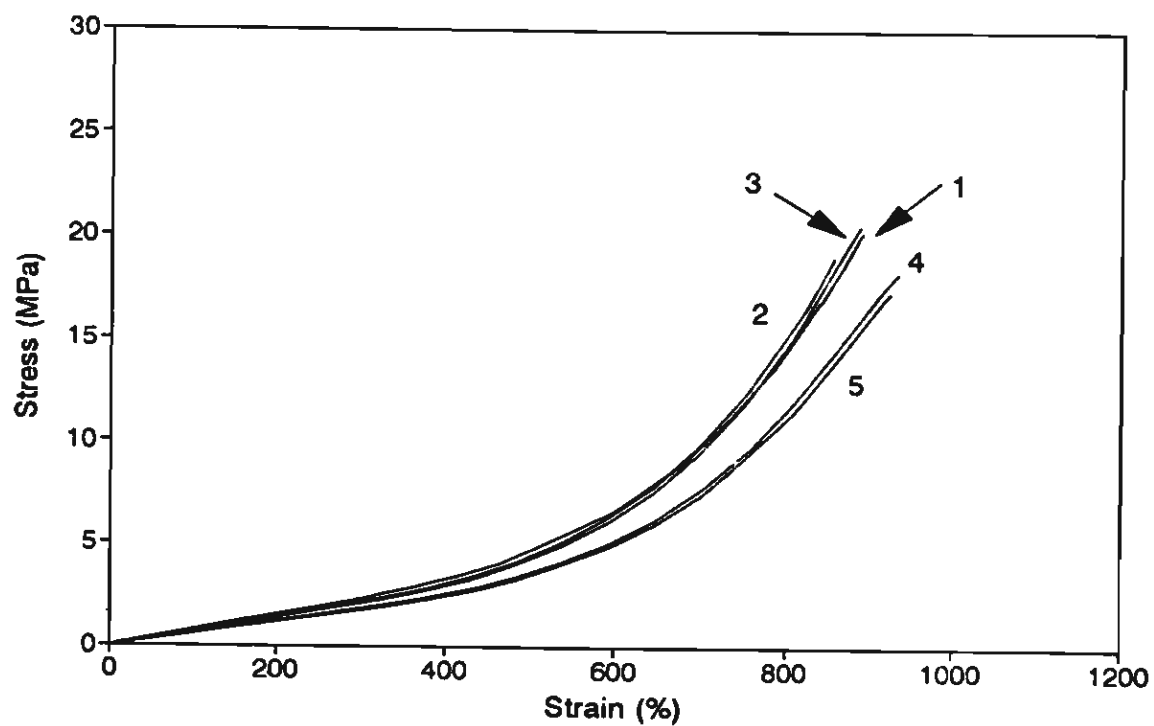
รูปที่ 3.4

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 20%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 20%



รูปที่ 3.5

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 (2) 5%; (3) 10%; (4) 15%; (5) 20%



รูปที่3.6 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 (2) 5%; (3) 10%; (4) 15%; (5) 20%

4. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่1

4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลต่อไปนี้ระหว่างยางผสมNR/ULDPEและยางผสมNR/SBR : คุณสมบัติการดึงยืด(tensile properties) ความต้านทานต่อการฉีกขาด(tear resistance) ความแข็ง(hardness) การกระดอน(resilience) ความต้านทานต่อการหักงอ(flex cracking resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู(abrasion resistance)

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ยางผสม B1 - B6 (ดูตารางที่3.1) ที่ใช้ในการทดสอบทุกชนิด เตรียมตามสูตรที่2ของบทที่3 (ตารางที่3.2) ยกเว้นชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อการหักงอจะมีปริมาณซิลเฟอร์มากขึ้นเล็กน้อย(2.5 phr) เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งมากพอต่อการทดสอบ ทำให้สามารถสังเกตความแตกต่างของยางผสมได้ วิธีการเตรียมยางคอมปาวด์อธิบายในบทที่2 (หัวข้อ2.3) ยางคอมปาวด์เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องหนึ่งคืน ก่อนนำไปวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัดให้ได้แผ่นซีทหนา1มม.และ3มม. และชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ

รายละเอียดของการทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่2 หัวข้อ2.4

4.2.2 การทดสอบคุณสมบัติการดึงยืด

ตัดแผ่นซีทที่หนา1มม. เป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 (die C) ด้วยวิธี die-cut นำไปทดสอบด้วยเครื่องLLOYD ใช้ความเร็วในการดึง 500 มม./นาที ทดสอบที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D412 ทดสอบจำนวน8ชิ้นต่อ1ตัวอย่าง

4.2.3 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 (die C) ชิ้นงานหนา 1 มม. ทดสอบด้วยเครื่องLLOYD ใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 มม./นาที ทดสอบที่อุณหภูมิห้องจำนวน8ชิ้นต่อ1ตัวอย่าง

4.2.4 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ชิ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบด้วยเครื่อง Zwick (Shore A) ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

4.2.5 การทดสอบการกระดอน

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2362 (Vertical Rebound) ชิ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

4.2.6 การทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D430 ชิ้นงานหนา 7 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 3 ชิ้น ต่อ 1 ตัวอย่าง เนื่องจากสูตรที่ 2 ซึ่งใช้ซิลเฟอร์เพียง 2phr ทำให้ชิ้นงานยืดหยุ่นมากเกินไปและไม่เกิดรอยแตกเลยเมื่อทำการทดสอบเป็นเวลานาน (มากกว่า 200,000 รอบ) ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลเฟอร์มากขึ้น คือ 2.5phr โดยคงอัตราส่วนของสารเคมีตัวอื่นๆไว้ ทำการทดสอบจำนวน 100,000 รอบ

4.2.7 การทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3389 ชิ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

4.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง

4.3.1 คุณสมบัติการดึงยืด

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ NR SBR ULDPE และยางผสม (B1 -B6) แสดงในรูปที่ 4.1-รูปที่ 4.9 ตามลำดับ และค่าคุณสมบัติการดึงยืดต่างๆสรุปในตารางที่ 4.1 รูปดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของผลการทดลอง (reproducibility) มีการเบี่ยงเบนของผลการทดลองเล็กน้อย ชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นแสดงคุณสมบัติเหมือนกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่มีนัยสำคัญ รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของวัตถุดิบเริ่มต้น (NR SBR และ ULDPE) รูปร่างกราฟของ NR ที่แสดงในรูปนี้ เหมือนกับ NR ทั่วไป คือต้องใช้แรงดึงสูงมากขึ้นเมื่อถูกดึงยืดมากขึ้น เพราะเกิดเป็นผลึก (strain-induced crystallization) ในขณะที่โมดูลัสช่วงแรกๆยังต่ำอยู่มาก ระยะยืดที่จุดขาดก็อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของ NR เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่า SBR เป็นยางที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า NR มาก ระยะยืดที่จุดขาดเป็นครึ่งหนึ่งของ NR รูปร่างของกราฟคล้ายกับ NR ในช่วงระยะยืดที่เท่าๆกัน คุณสมบัติของ SBR ที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไป รูปร่างกราฟของ ULDPE แตกต่างจากยางทั้งสองชนิด ULDPE มีโมดูลัสเริ่มแรกสูงมาก ค่าโมดูลัสของ ULDPE มีค่าสูงกว่า NR ตั้งแต่เริ่มดึงไปจนถึงที่ระยะยืด 500% ULDPE มีค่าความแข็งแรงที่จุดขาด (tensile strength) ต่ำกว่า NR มากพอสมควร แต่มีระยะยืดที่จุดขาด (elongation at break) ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของยางผสม NR/SBR และ NR/ULDPE โดยเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้นตามลำดับ รูปร่างกราฟของยางผสม NR/SBR มีลักษณะใกล้เคียงกับ NR ถึงแม้ว่าจะมี SBR อยู่ในปริมาณเท่าๆกันกับ NR แสดงว่ายางผสม NR/SBR แสดงพฤติกรรมหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะถูกดึงยืดเช่นเดียวกัน NR ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 600% ($E_{600\%}$) มีทิศทางเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ในขณะที่ค่าความแข็งแรงที่จุดขาด ค่าโม

คูลัสที่ระยะยืด300%($E_{300\%}$) และระยะยืดที่จุดขาดของNRลดลงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณSBRเพิ่มมากขึ้น(ตารางที่4.1) ยางผสมNR/ULDPEแสดงรูปร่างกราฟอยู่ระหว่างNRและULDPE ซึ่งเป็นลักษณะอย่างหนึ่งของยางผสมที่เข้ากันได้ดีหรือเป็นพวก compatible blend ยางผสมNR/ULDPEจะให้ค่าโมดูลัส ($E_m - E_{500\%}$) ความแข็งแรงที่จุดขาด และระยะยืดที่จุดขาดสูงกว่ายางผสมNR/SBR(เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนNRที่เท่ากัน) คุณสมบัติโดยรวมของยางผสมNR/ULDPEทั้งสามอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าคุณสมบัติการดึงยืดของยางผสมทั้งสองชนิดที่ได้จากการทดลอง(experiment) จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ(calculation)ตามทฤษฎี (rule of mixture) ที่อธิบายในบทที่3 ยางผสมNR/ULDPEจะแสดงค่าที่ได้จากการทดลองสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ มากกว่าที่ปรากฏในยางผสมNR/SBR (ตารางที่4.1)

รูปที่4.13และ4.14เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่จุดขาด และระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมNR/SBRและของยางผสมNR/ULDPEในทุกอัตราส่วน ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณตามลำดับ พบว่าคุณสมบัติทั้งสองชนิดของยางผสมNR/ULDPE มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้โดยการใช้ Rule of Mixture ในขณะที่ยางผสมNR/SBR ให้ค่าใกล้เคียงกันมากกว่า แสดงว่าNRและULDPEนี้มีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี(compatibility) เนื่องจากแสดงลักษณะเบี่ยงเบนไปทางบวก (positive deviation) ดังนั้น สามารถจัดยางผสม NR/ULDPE เป็น compatible blend ได้ นอกจากนี้ผลการทดลองที่มีค่าreproducibilityสูงของยางผสมชุดนี้ มีส่วนสนับสนุนในการจัดเป็น compatible blend ส่วนยางผสมNR/SBRนั้น จะให้ค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จาก Rule of Mixture และเป็นที่ทราบกันดีว่า ยางผสมNR/SBRนี้เป็น compatible blend นอกจากนี้ค่าreproducibilityนี้บ่งบอกความสม่ำเสมอของผลการทดลอง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการผสมที่ให้ส่วนผสมกระจายสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างยางผสมสองชุดนี้พบว่า ยางผสมNR/ULDPEให้ค่าความแข็งแรงที่จุดขาดและระยะยืดที่จุดขาดสูงกว่ายางผสมNR/SBRในทุกอัตราส่วน ดังแสดงในรูปที่4.15-รูปที่4.18 จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่า ยางผสมชนิดใหม่ที่เตรียมจากNRผสมกับULDPEสามารถเตรียมขึ้นได้ในอัตราส่วนที่ศึกษา ยางผสมNR/ULDPEแสดงคุณสมบัติเชิงกลทางด้านการดึงยืดดีกว่ายางผสมNR/SBR และน่าจะมีความสามารถนำไปใช้งานด้านที่ต้องการความเหนียวต่อแรงดึงแทนยางผสมNR/SBRได้

4.3.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance, T_s) ตามมาตรฐาน ASTM D624 นั้นคำนวณได้ดังนี้

$$T_s = F/d$$

เมื่อ

T_s = tear resistance, kN/m

F = force, N

d = specimen thickness, mm

นั่นคือ แรงที่ทำให้ชิ้นงานขาดด้วยความหนาของชิ้นงาน ค่าที่คำนวณจากสมการดังกล่าวและค่าที่คำนวณได้จาก Rule of Mixture แสดงไว้ในตารางที่4.2และรูปที่4.19 ยางผสมNR/ULDPEให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางผสมNR/SBRในทุกอัตราส่วน เนื่องจากULDPEมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าSBRและมีค่าต่ำกว่าNRเล็กน้อย ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย Rule of Mixture ดังนั้น ผลการทดลองนี้สนับสนุนข้อสรุปข้างบนที่ว่า ยางผสมNR/ULDPEเป็น compatible blend

ลักษณะการฉีกขาดของวัตถุดิบเริ่มต้นมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่4.20 ในรูปนี้ค่า Normalized Load คือแรงที่กระทำด้วยความหนาของชิ้นงาน สังเกตได้ว่าลักษณะกราฟของSBRเป็นไปตามNRแต่ขาดเร็วกว่าNRมาก ULDPEให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับNR แต่มีการยืดตัวต่ำกว่ามาก รูปร่างของกราฟแตกต่างจากNRมาก คือ จะมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดสูงมากในช่วงดึงยึดต่ำ ถ้าพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งบ่งบอกพลังงานที่ใช้ในการฉีกชิ้นงานพบว่าNRน่าจะใช้พลังงานสูงกว่าULDPE อย่างไรก็ตามต้องระลึกอยู่เสมอว่า ULDPEไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล แต่NRมีการเชื่อมโยงของโมเลกุลอันเนื่องมาจากการวัลคาไนซ์ กราฟแสดง Normalized Load - Extension ของยางผสมทั้งสองชนิด แสดงในรูปที่4.21-รูปที่4.23 กราฟของยางผสมNR/SBRมีรูปร่างเหมือนกับNR ส่วนกราฟของยางผสมNR/ULDPEมีรูปร่างผสมระหว่างNRและULDPE B4(30%ULDPE) ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าNRและมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดกลืนพลังงานก่อนการฉีกขาดได้มากกว่า นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบยางผสมทุกชนิดแล้ว พบว่ายางผสมB4นี้มีความต้านทานต่อการฉีกขาด ดีมากและดีที่สุด (รูปที่4.23) ดังนั้น จากผลการทดลองนี้ สรุปได้ว่า ยางผสมชนิดใหม่นี้(NR/ULDPE)ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางผสมNR/SBR

4.3.4 ความแข็ง

ทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง 2 ครั้ง ครั้งที่1 (Test #1) ทำภายในวันเดียวกันหลังจากวัลคาไนซ์และปล่อยให้เย็น 3 ชั่วโมง ครั้งที่2 (Test #2) วัดชิ้นงานเดียวกันใน 2 สัปดาห์ถัดมา ผลการทดสอบแสดงในตารางที่4.3 ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน ยางผสมทุกชนิดมีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติ โดยเฉพาะยางผสมNR/ULDPEจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นมากและแข็งมากกว่ายางผสมNR/SBR ความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของULDPE ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงการลดลงของความยืดหยุ่น (flexibility) และสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของโมดูลัส ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่เตรียมได้นี้ ชี้แนะว่าสูตรที่ใช้ในการเตรียมยางครั้งนี้(สูตรที่2ในตารางที่3.2) อาจมีซิลเฟอร์น้อยไป ทำให้การเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นไม่มากนัก ส่วนค่าความแข็งของULDPEนั้นสังเกตได้ในตารางที่1.1 มีค่าสูงกว่าค่าความแข็งของNRเกือบหนึ่งเท่าตัว ดังนั้น ผลการทดลองจึงเป็นไปตามที่คาดหมายไว้ คือ ยางผสมNR/ULDPEจะมีความแข็งสูงกว่ายางผสมNR/SBR ค่าความแข็งที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณตามทฤษฎี

4.3.5 การกระดอน

ค่าการกระดอนถูกทดสอบสองครั้งเช่นเดียวกับการวัดความแข็ง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่4.4 เป็นที่ทราบกันดีว่ายางธรรมชาติแสดงค่าการกระดอนได้ดีมาก จากการทดลองพบว่า ค่าการกระดอนของยางธรรมชาติและยางผสมที่วัดทั้งสองครั้ง มีความแตกต่างเล็กน้อย ค่าการกระดอนของยางธรรมชาติจะลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการผสมกับSBRและULDPE ULDPEส่งผลต่อการกระดอนของNRมากกว่าผลของSBR B6แสดงค่าการกระดอนต่ำสุด การเติมULDPEลงไปครึ่งหนึ่งของNRทำให้ค่าการกระดอนลดลงเพียง8%จากค่าของNRเท่านั้น กล่าวได้ว่าค่าการกระดอนของยางผสมชนิดใหม่มีค่าต่ำลงไม่มากนัก ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับยางผสมNR/SBR ดังนั้นULDPEไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกระดอนของNR และสามารถใช้แทนยางผสมNR/SBRได้โดยให้ค่าการกระดอนในช่วงใช้งานใกล้เคียงกัน

4.3.6 ความต้านทานต่อการหักงอ

ผลการทดลองแสดงในตารางที่4.5 ตัวอย่างถูกทดสอบถึง100,000 รอบ ยางผสมที่มีSBRมีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานต่อการหักงอสูงกว่ายางที่ผสมด้วยULDPE ยางผสม B1 B2 B3 และ B5 ไม่ปรากฏรอยแตกให้เห็นในชั้นทดสอบทุกชั้น ส่วนยางผสมB4มีรอยแตกปรากฏในหนึ่งชั้นทดสอบเมื่อทดสอบได้ถึง85,000รอบ ส่วนชั้นทดสอบอีกสองชั้นไม่ปรากฏรอยแตกที่100,000รอบ ยางผสมB6แสดงค่าความต้านทานต่ำที่สุด ชั้นทดสอบทั้งสามชั้นปรากฏรอยแตกให้เห็นที่จำนวนรอบดังนี้ 65,000 79,000 และ 100,000 อย่างไรก็ตาม ผู้เชี่ยวชาญที่ศูนย์วิจัยยางสงขลาให้คำแนะนำว่า น่าจะมีการปรับปรุงสูตรสารเคมี เพื่อเพิ่มความแข็งและควรมีความแข็งมากกว่า 50(Shore A) (ถึงแม้ว่ายางผสมสำหรับการทดสอบนี้จะใช้ซิลิโคนเพิ่มมากขึ้นแล้วก็ตาม) ซึ่งจะช่วยให้ใช้เวลาในการทดสอบสั้นลงและเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้มีอายุการใช้งานนานมาก การตั้งจำนวนรอบไว้ที่ 100,000 รอบ จะใช้เวลา 5 ชั่วโมง และการทดสอบแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 ชั่วโมง เพราะเครื่องทดสอบจะร้อนมาก นอกจากนี้ ค่าจำนวนรอบที่บันทึก เป็นค่าที่เริ่มเห็นรอยแตก ที่มีขนาดเล็กมากและต้องส่องดูด้วยแว่นขยาย อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองชี้แนะว่า ยางผสมNR/ULDPE มีแนวโน้มแสดงค่าความต้านทานต่อการหักงอต่ำกว่ายางผสมNR/SBR ผลการทดลองที่ได้ก็มีได้เป็นที่น่าประหลาดใจ เพราะเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของการเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลที่เกิดขึ้นในยางNRและSBR แต่ไม่ปรากฏในULDPE และค่าความแข็งของULDPEที่สูงกว่ายางทั้งสองนั้น เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความยืดหยุ่นของยางผสมNR/ULDPEน้อยกว่าของยางผสมNR/SBRมาก ความต้านทานต่อการหักงอต่ำนี้ เป็นข้อด้อยของยางผสมชนิดใหม่ที่เตรียมได้ จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงสูตรหรือพัฒนายางผสมNR/ULDPEนี้ ให้มีความต้านทานต่อการหักงอดีขึ้น

4.3.6 ความต้านทานต่อการขัดถู

จากการทดลองวัดความต้านทานต่อการขัดถูด้วยเครื่องTaberของยางธรรมชาติที่เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในตารางที่3.2 พบว่า ยางนิ่มเกินไป ทำให้ยางติดลูกกลิ้งเมื่อทำการขัดถูไปได้ 1,000 รอบ ไม่สามารถทำการทดสอบต่อไปได้ ดังนั้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสูตรยางใหม่เพื่อให้มีความแข็งเพิ่มมากขึ้นและเหมาะสมต่อการหาค่าความต้านทานต่อการขัดถู ค่าความต้านทานต่อการขัดถูของยางผสมที่เตรียมโดยสูตรปรับปรุงใหม่ บรรยายในบทที่5

4.4 สรุปผลการทดลอง

1. ULDPEสามารถผสมเข้ากับNRได้ดีในทุกอัตราส่วน สามารถจัดเป็น compatible blend ได้ เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของยางผสม ที่ให้คุณสมบัติดีขึ้นหรือไม่ด้อยกว่าNR และค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี
2. ยางผสมNR/ULDPEแสดงคุณสมบัติการดึงยึดที่ดีใกล้เคียงกับNR และดีกว่ายางผสมNR/SBRในทุกอัตราส่วน
3. ยางผสมNR/ULDPEให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางผสมNR/SBR B4(30%ULDPE)ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุดและสูงกว่าNR
4. ยางผสมNR/ULDPEแข็งแรงกว่ายางผสมNR/SBR และยางผสมทั้งสองชนิดแข็งแรงกว่าNR
5. ค่าการกระดอนของยางผสมทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าNR ค่าการกระดอนลดลงเมื่อปริมาณNRลดลง
6. ยางผสมNR/ULDPEมีแนวโน้มแสดงความต้านทานต่อการหักงอต่ำกว่ายางผสมNR/SBR
7. สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้(สูตรที่2ในบทที่3) ไม่เหมาะสมต่อการทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการดึงยึด(Tensile properties)ของNR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

Sample	E _{300%} (MPa)	E _{600%} (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)
NR	2.06 ± 0.07 [*]	7.45 ± 0.27	21.00 ± 2.31	889 ± 33
SBR	1.30 ± 0.10	1.88 ± 0.33	2.47 ± 0.57	510 ± 96
ULDPE	3.51 ± 0.04	6.59 ± 0.08	10.27 ± 0.21	784 ± 10
B1	2.58 ± 0.15	8.31 ± 0.71	18.91 ± 2.58	795 ± 26
B2	2.43 ± 0.08	7.47 ± 0.32	14.58 ± 4.07	750 ± 83
B3	2.31 ± 0.07	6.92 ± 0.26	13.62 ± 4.66	740 ± 107
B4	2.49 ± 0.08	7.23 ± 0.31	22.72 ± 1.21	972 ± 25
B5	2.62 ± 0.03	7.22 ± 0.29	23.12 ± 1.01	933 ± 28
B6	2.82 ± 0.08	7.24 ± 0.25	20.45 ± 0.57	920 ± 20
ค่าที่ได้จากการคำนวณ				
B1	1.83	5.78	15.44	775
B2	1.76	5.22	13.59	737
B3	1.68	4.67	11.74	670
B4	2.50	7.19	17.78	858
B5	2.64	7.11	16.71	847
B6	2.79	7.02	15.64	837

หมายเหตุ ใช้ L₀ เท่ากับ 65 มม.

^{*} ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation)

ตารางที่4.2 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด(Tear resistance)ของ NR SBR ULDPE ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

Sample	Tear Resistance (kN/m)	
	Experiment	Calculation
NR	29.1 ± 1.2	-
SBR	7.7 ± 0.6	-
ULDPE	27.0 ± 0.8	-
B1	25.9 ± 1.4	22.7
B2	20.7 ± 1.0	20.6
B3	21.1 ± 1.2	18.4
B4	32.0 ± 2.8	28.5
B5	26.3 ± 1.3	28.3
B6	26.4 ± 0.4	28.1

ตารางที่4.3 ค่าความแข็ง(Hardness)ของNR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

Sample	Hardness (Shore A)			
	Test #1	Test #2	Average	Calculation
NR	38.88 ± 0.29	38.98 ± 0.31	39	-
B1	41.74 ± 0.43	42.24 ± 0.30	42	-
B2	41.46 ± 0.35	42.18 ± 0.35	42	-
B3	42.66 ± 0.74	42.98 ± 0.23	43	-
B4	48.48 ± 0.30	50.00 ± 0.21	49	50
B5	51.60 ± 0.32	52.76 ± 0.21	52	53
B6	54.58 ± 0.49	56.62 ± 0.31	56	57

(ความแข็งของULDPEเท่ากับ 75)