



สัญญาเลขที่ PDF/83/2540

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ยางผสมชนิดใหม่ : ยางธรรมชาติผสมโพลีเอททิลีนชนิด
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

Order Key	26369
BIB Key	171632

สมอ

เลขหมู่	TS1815 646 81
เลขทะเบียน	
	20 ส.ค. 2543

บทคัดย่อ

โครงการเลขที่ : PDF/83/2540

ชื่อโครงการวิจัย : ยางผสมชนิดใหม่ : ยางธรรมชาติผสมโพลีเอททิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก

นักวิจัย: ดร. วราภรณ์ ตันรัตนกุล (สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์)

รศ. ดร. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย)

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

ระยะเวลาที่ทำวิจัย : 1 สิงหาคม 2540 - 31 กรกฎาคม 2542

วัตถุประสงค์ : 1. ผลิตยางผสมชนิดใหม่ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก

2. ตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางผสมชนิดใหม่กับยางผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ และศึกษาความเข้ากันได้ดีของยางผสมชนิดใหม่

กระบวนการวิจัย : NRผสมกับULDPEในอัตราส่วน70/30 60/40 และ 50/50 (wt/wt) ด้วยเครื่อง
บดสองลูกกลิ้ง วัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ภายในเครื่องอัด นำแผ่นซีทที่ได้ตัดเป็นชิ้นงาน เพื่อทดสอบ
คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐานASTM NRถูกผสมกับSBRภายใต้วิธีการ
ผสมจนถึงการเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่นเดียวกับยางผสมNR/ULDPE ทำ
การเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางผสมทั้งสองชนิดนี้

ผลที่ได้จากการวิจัย : ยางผสมNR/ULDPEมีคุณสมบัติเชิงกลด้านดึงยึด ความต้านทานต่อการ
ฉีกขาด และคุณสมบัติเชิงกลด้านดึงยึดหลังจากได้รับความร้อนและออกซิเจน ดีกว่ายาง
ผสมNR/SBR แต่มีความต้านทานต่อการขีดถูและความต้านทานต่อการหักงอต่ำกว่า ค่าความหนืด
มูนิและค่าการกระดอนของยางผสมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความแข็งของยางผสมชนิดใหม่นี้มี
ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ยางผสมNR/ULDPEมีลักษณะแยกเฟสระดับไมโคร แต่ผสมเข้ากันได้ดีโดยไม่ต้อง
ต้องมีวัสดุอื่นช่วย พอลิเมอร์ทั้งสองจะมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องเมื่อมีอัตราส่วนเท่ากัน(50/50)

สาระสำคัญของผลที่ได้ : ยางผสมNR/ULDPEและมีลักษณะเป็น compatible blend และ
แสดงคุณสมบัติเชิงกลด้านดึงยึดใกล้เคียงกับNRและดีกว่ายางผสมNR/SBR ยางผสมชนิดใหม่นี้
สามารถใช้แทนยางผสมNR/SBRได้ในกรณีที่ต้องการถึงคุณสมบัติต่อไปนี้: คุณสมบัติด้านดึงยึด ความ
ต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพหลังจากได้รับความร้อนและออกซิเจน

ข้อเสนอแนะ : งานวิจัยที่จะทำต่อคือการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง
มอร์โฟโลยี วัลคาไนซ์ULDPEด้วยเปอร์ออกไซด์รวมทั้งมีการเติมเขม่าดำ(carbon black) สิ่งเหล่านี้
จะมีผลกระทบโดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลและทางกายภาพ อาจทำให้มีการปรับปรุงข้อด้อยที่เกิดขึ้น
ได้

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 Udomkichdecha (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

รายชื่อตาราง

1. บทนำ

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

3. การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดสูตร

ตารางที่ 3.1 อักษรย่อแทนยางผสมแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.2 สูตรคอมปาวด์เบื้องต้น

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติการดึงยืด (Tensile properties) ของ NR SBR ULDPE ยางผสม NR/SBR และยางผสม NR/ULDPE ที่เตรียมจากสูตรที่ 1-สูตรที่ 3

ตารางที่ 3.4 ค่า Intrinsic viscosity (IV) ของยางธรรมชาติเหลวที่คำนวณได้จากค่า Reduced viscosity

ตารางที่ 3.5 ค่า Intrinsic viscosity (IV) ของยางธรรมชาติเหลวที่คำนวณได้จากค่า Inherent viscosity

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติการดึงยืด (Tensile properties) ของ NR และยางผสม NR/ULDPE ที่มียางธรรมชาติเหลวเป็นองค์ประกอบ

4. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่ 1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการดึงยืด (Tensile properties) ของ NR SBR ULDPE ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่ 2 ในบทที่ 3)

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ของ NR SBR ULDPE ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่ 2 ในบทที่ 3)

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็ง (Hardness) ของ NR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่ 2 ในบทที่ 3)

ตารางที่ 4.4 ค่าการกระดอน (Resilience) ของ NR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่ 2 ในบทที่ 3)

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานต่อการหักงอ (Flex cracking resistance) ของยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่ 2 ในบทที่ 3 แต่เพิ่มปริมาณซิลเฟอร์เป็น 2.5 phr)

5. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่ 2

- ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสูตรคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 1 ในบทที่ 4 และสูตรคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดลองชุดปัจจุบัน (สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติการดึงยืด (Tensile properties) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดึงยืด (Tensile properties) ระหว่างสูตรเก่า (สูตรที่ 2, Old) และสูตรปรับปรุง (New) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6)
- ตารางที่ 5.4 ค่าความแข็ง (Hardness) และการกระดอน (Resilience) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR และยางผสม NR/ULDPE (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็ง (Hardness) และการกระดอน (Resilience) ระหว่างสูตรเก่า (สูตรที่ 2, Old) และสูตรปรับปรุง (New) ของ NR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6)
- ตารางที่ 5.6 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR และยางผสม NR/ULDPE (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่ 5.7 คุณสมบัติการดึงยืดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่ 5.8 คุณสมบัติการดึงยืดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง แต่ไม่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนท์)
- ตารางที่ 5.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยืดหลังการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)
- ตารางที่ 5.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยืดหลังการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง แต่ไม่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนท์)
- ตารางที่ 5.11 ค่าความหนืดมูนี (Mooney viscosity) ของ NR SBR ULDPE ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ไม่มีสารเคมีเป็นส่วนผสม)

6. มอร์โฟโลยี (Morphology) ของยางผสม

- ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่องดีเอสซี (DSC)

รายชื่อรูปภาพ

2. วัตถุประสงค์ 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)

รูปที่5.8 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่600%(Modulus at 600%) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของNR SBR ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (no PAN)

รูปที่5.9 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงที่จุดขาด(Tensile strength) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของNR SBR ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(no PAN)

รูปที่5.10 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงระยะยืดที่จุดขาด(Elongation at break)หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(PAN)และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (no PAN)

6. มอร์โฟโลยี(Morphology)ของยางผสม

รูปที่6.1 ภาพถ่ายจากเครื่องSEMของชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 3 วัน (a) NR; (b) SBR; (c) B3 (50%SBR)

รูปที่6.2 ภาพถ่ายจากเครื่องSEMของB6(50%ULDPE) (a) ชิ้นงานก่อนแช่พาราไซลีน; (b) ชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 5 วัน

รูปที่6.3 ภาพถ่ายจากเครื่องSEMของชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 5 วัน (a) B5(40%ULDPE); (b) B4(30%ULDPE)

รูปที่6.4 DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งแรก (first heating scan)

รูปที่6.5 DSC thermograms จากการทำให้เย็นลง (cooling scan)

รูปที่6.6 DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan)

Executive Summary

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

ยางผสมNR/ULDPEและยางผสมNR/SBR เตรียมโดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 70 - 80^oซ. 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^oซ. เป็นเวลา 30 นาที โดยทำเป็นแผ่นซีทที่มีความหนา 1 มม. และ 3 มม. แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆตามมาตรฐาน ASTM

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

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

จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ สรุปได้ว่า โครงการวิจัยได้บรรลุวัตถุประสงค์ คือ สามารถเตรียมยางผสมชนิดใหม่นี้ได้ ซึ่งทั้งสองชนิดนี้เข้ากันได้ดีในกระบวนการผสม ยางผสมชนิดใหม่ให้คุณสมบัติทั้งที่ดีกว่าและด้อยกว่ายางผสมNR/SBR คุณสมบัติที่ด้อยกว่าของยางผสมชนิดใหม่นี้ น่าจะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลของULDPE ดังนั้นจึงเป็นสัญญาณที่ดีว่า ยางผสมชนิดใหม่นี้ น่าจะใช้แทนยางผสมNR/SBRได้ ในงานที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลต้านการดึงยืดและความทนทานต่อโอโซนที่ดีขึ้น

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

1. บทนำ

ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นเวลาเกือบสี่ร้อยปีมาแล้ว ประเทศไทยมีการปลูกยางธรรมชาติมาเป็นเวลาร่วมหนึ่งร้อยปีและปัจจุบันนี้ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก วิวัฒนาการด้านเทคโนโลยีของยางธรรมชาติได้มีการพัฒนาต่อเนื่องตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน [1-3] เช่น การทำยางธรรมชาติที่มีความหนืดคงที่ การทำยางธรรมชาติเหลว การเชื่อมโยง methyl methacrylate(MMA) บนสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ(MGNR) การเติมน้ำมันลงไปยางธรรมชาติ(OENR) การทำอีพ็อกซีเดชัน(ENR) การผสมยางธรรมชาติกับพลาสติก(TPNR) การนำยางธรรมชาติไปใช้กับสะพาน การนำยางธรรมชาติไปใช้กับอาคารสิ่งก่อสร้างในบริเวณที่มีแผ่นดินไหว การนำยางธรรมชาติไปใช้ในยางรถยนต์และพาหนะอื่นๆ การทำถุงมือยางที่ไม่ต้องใช้แป้ง การทำถุงมือยางที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ(DPNR) สิ่งเหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของวิวัฒนาการเท่านั้น ยังมีอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ

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 อย่างไรก็ตามไม่เป็นการง่ายนักที่จะนำยางชนิดต่างๆ มาผสมกัน แล้วได้ยางผสมที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เนื่องจากปัญหาความไม่เข้ากันหรือไม่ชอบผสมกัน(uncompatibility)ของยางผสม ปัญหาด้านการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดที่มีอัตราเร็วไม่เท่ากัน ปัญหาการกระจายตัวของสารตัวเติมต่างๆ โดยเฉพาะเขม่าดำ(carbon black) ปัญหาเหล่านี้จะเกิดมากขึ้นในคู่ของยางผสมที่มีความแตกต่างด้านพันธะคู่หรือความเป็นขั้วต่างกันอย่างมากขึ้น 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) ฮีสเทอเรซิส(hysteresis) คุณสมบัติการดึงยึด(tensile properties) ความต้านทานต่อการฉีกขาด(tear resistance) ความต้านทานการเหนียวล้า(fatigue resistance) ความต้านทานต่อการขัดถู(abrasion resistance) ความต้านทานต่อการแตก(cracking and cut growth) ความต้านทานต่อโอโซน(ozone attack) การนำไฟฟ้า(electrical conductivity)

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

การนำยางธรรมชาติผสมกับพอลิเมอร์ตระกูลโพลีโอเลฟิน มีขึ้นประมาณยี่สิบกว่าปีแล้ว ในปัจจุบันได้มีการผลิตเชิงพาณิชย์ทั้งในประเทศมาเลเซียและสหรัฐอเมริกา โดยทำการผสมโพลีโพรพิลีน(PP)กับยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ผสมคู่นี้ถูกเตรียมขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่เรียกว่า Thermoplastic Elastomer (TPE) เช่นเดียวกับการเตรียมTPEที่มีโพลีโพรพิลีนผสมกับยางอีพดีเอ็ม(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) พบว่าโพลีเอทิลีนเหล่านี้ให้คุณสมบัติไม่ตีตามที่ต้องการ และจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเหลือช่วยในการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ได้มีการศึกษาทางธรรมชาติผสมกับอีลาสโตเมอร์อื่นๆ เช่น สไตรีน-เอทิลีนบิวทีน-สไตรีน (SEBS) [52] และเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) [53-59] จากการศึกษาพบว่าทางธรรมชาติผสมกับSEBSไม่แสดงคุณสมบัติที่ดี SEBSมิได้ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของยางผสมดีขึ้น กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาทางธรรมชาติผสมกับEVAนั้นอยู่ในประเทศอินเดีย นักวิจัยกลุ่มนี้ระบุว่ายางผสมระหว่างNRและEVAนี้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้าและสายเคเบิล โดยยางผสมชนิดนี้จะแสดงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีของNR และแสดงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ(aging properties)ที่ดีของEVA จากการศึกษาพบว่ายางผสมจะมีความต้านทานต่อโอโซนสูงกว่ายางธรรมชาติ การวัลคาไนซ์EVAด้วยไดคัลคิวเปอร์อ็อกไซด์(DCP)และการเติมcompatibilizer จะทำให้ได้ยางผสมที่มีคุณสมบัติดี

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

โครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเบื้องต้นของการเตรียมยางผสมชนิดใหม่ที่ยังไม่มีการศึกษามาก่อน ยังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาต่อไปในระดับลุ่มลึกมากยิ่งขึ้น การทดสอบคุณสมบัติต่างๆต้องพึงพาอุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ ทำให้มีอาจทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพได้มากกว่าที่ทำอยู่ เช่น มีเครื่องมือชำรุดระหว่างการทำวิจัย คือ เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน จึงไม่สามารถทดสอบคุณสมบัตินี้ได้ ในโครงการนี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังคงดำเนินต่อไป คณะวิจัยยินดีรับฟังคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของผู้อ่าน อันจะยังประโยชน์ต่อการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

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 ยางเอสปีอาร์ (SBR petroFLEX[®]) ชนิดเกรดทั่วไปซึ่งประกอบด้วยสไตรีน 23.5% สังเคราะห์โดยวิธีอิมัลชันพอลิเมอร์โรเซชัน (emulsion polymerization) ที่อุณหภูมิ 10 °ซ. โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (ULDPE ENGAGE[®] 8150) ที่ใช้มีความหนาแน่น 0.868 กรัม/ซม.³ ผลิตโดย บริษัทดาวเนี่ยมคอลล จำกัด สมบัติทางกายภาพของULDPE(ENGAGE[®] 8150)สรุปในตารางที่1.1 NRและSBRถูกวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์และมีสารเคมีอื่น ๆ ดังนี้ 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) ซึ่งมีแม่แบบทำด้วยสแตนเลสและมีความคมที่สามารถตัดชิ้นงานให้มีรูปร่างตามแบบนั้นได้ 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

อีก5นาที เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์ไม่เกิน 25 นาที เก็บยางคอมปาวด์ไว้ที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่เกิน24ชั่วโมงก่อนนำไปวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัด ระหว่างการบดผสมจะปรับ ระยะห่างของลูกกลิ้งให้แคบที่สุดที่ยังคงให้แผ่นซีท(sheet)หนาสม่ำเสมอ และมีการเปลี่ยนทิศทาง ของแผ่นซีทในการป้อนเข้าลูกกลิ้งทุกครั้ง คือ เมื่อได้แผ่นซีทออกมา จะพับแผ่นซีทตามทิศทาง เครื่อง(machine direction, MD) ในการป้อนครั้งต่อไปจะป้อนทิศทางขวาง(transverse direction, TD)ของแผ่นซีทเข้าเครื่อง ดังนั้นTDของแผ่นซีทครั้งก่อนจะกลายเป็นMDของแผ่นซีทครั้งปัจจุบัน ดังแสดงในรูป2.1 การทำเช่นนี้ตลอดการใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง จะช่วยให้มีการผสมกระจายได้ดี มากขึ้น ลดปัญหาคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง

เครื่องอัดถูกตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 140°C. ขั้นตอนการวัลคาไนซ์มีดังนี้ ยางคอมปาวด์ถูกให้ความ ร้อนโดยใช้แรงอัดเล็กน้อย เพื่อให้ฝ้าบนและฝ้าล่างของเครื่องอัดประกบกัน(pre-heating)เป็น เวลา5นาที ใช้แรงอัดให้มีความดันเท่ากับ 600 กก/ซม.² เป็นเวลา25นาที ระหว่างนี้มีการปล่อยแรง อัดเพื่อขับไล่อากาศเป็นเวลาสองครั้ง เมื่อครบกำหนดเวลา เอาแผ่นยางออกจากเครื่องอัด ทิ้งให้เย็น ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปตัดเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ แผ่นยางที่ได้จากเครื่องอัดมี ขนาด 12.5x12.5x0.1 ซม.³ หรือ 12.5x12.5x0.3 ซม.³

แผ่นยางที่มีความหนา 1 มม. จะถูกตัดด้วยแม่แบบที่มีรูปร่างตามเบสส์ เพื่อใช้เป็นชิ้นงานใน การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ยางเอสบีอาร์

ใช้วิธีการเช่นเดียวกับNRทุกประการ ยกเว้นไม่ต้องบดยางให้นิ่ม

ยางผสม

NRถูกบดให้นิ่มก่อนแล้วนำSBRหรือULDPEมาผสม การผสมยางทั้งสองให้เข้ากันได้ดีจะ ใช้เวลาไม่เกิน10นาทีนับตั้งแต่เวลาเริ่มบดNR ขณะผสมยางทั้งสองเข้าด้วยกัน จะใช้วิธีการเปลี่ยน ทิศทางของแผ่นซีท(MD-TD)ในการป้อนเข้าลูกกลิ้งตลอดเวลา เพื่อช่วยให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี อย่างสม่ำเสมอตลอดหน้ากว้างของลูกกลิ้ง ต่อจากนี้เติมสารเคมีและดำเนินการต่อไปตามวิธีการ เดียวกันกับการเตรียมNRทุกประการ

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติและวิธีการทดสอบ

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

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

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

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

4. เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบดิเอสซี (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่นDSC7 (Perkin Elmers) ใช้ตรวจสอบพฤติกรรมของการเป็นผลึกของULDPE ตรวจสอบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -20 °ซ. ถึง +100 °ซ. ใช้อัตราการให้ความร้อนและอัตราการทำให้เย็นเท่ากับ 10 °ซ./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

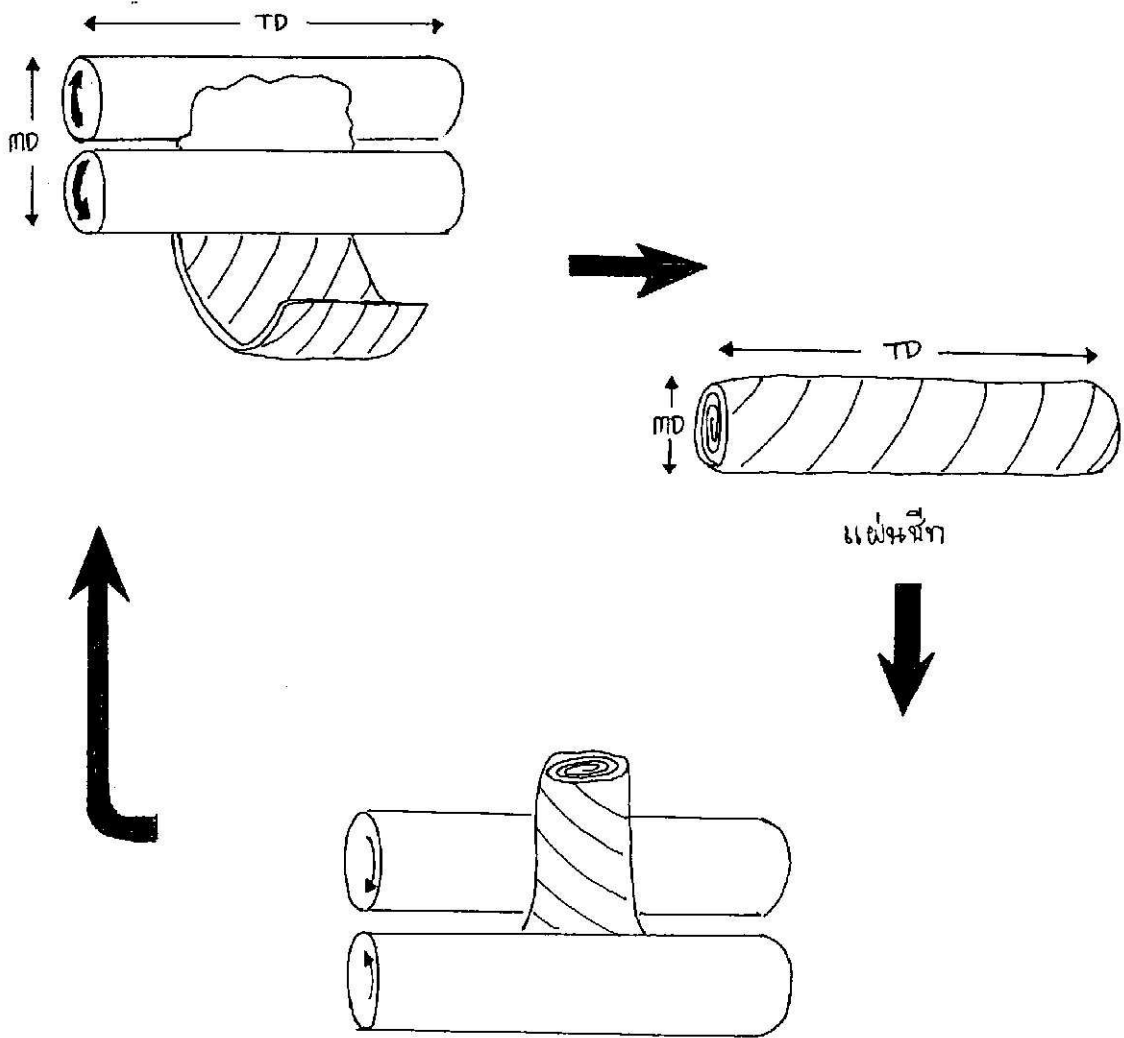
7. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) รุ่น5131 (TABER) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3389 ชิ้นงานหนา 3 มม. มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 115 มม. ใช้หินขัดเบอร์10 (อย่างละเอียด) น้ำหนัก 1,000 กรัม วางลงบนชิ้นงานที่หมุนรอบด้วยความเร็ว 60 รอบ/นาที่ ซึ่งน้ำหนักก่อนทดสอบและน้ำหนักหลังจากทดสอบไป3,000รอบ น้ำหนักที่หายไปเป็นตัวบ่งชี้ความต้านทานต่อการขัดถู ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบสองครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

8. เครื่องทดสอบคุณสมบัติการดึงยืด (Tensile testing machine) รุ่น 1000S (LLOYD) ใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืด (Tensile properties) ตามมาตรฐานASTM D412(die C) ใช้ทดสอบความต้านทานต่อการฉีก (Tear resistance) ตามมาตรฐานASTM D624(die C) และใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืดหลังการอบด้วยความร้อนและอ็อกซิเจน(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 เมื่อได้รับความร้อนและอ็อกซิเจน (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 การทดลองที่1 : 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. เตรียมโดยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิ 140^oซ. เม็ดULDPEถูกให้ความร้อนเป็นเวลา10นาทีก่อนที่จะมีการอัดความดันไปที่ 600 กก./ซม.² ULDPEถูกหลอมภายใต้ความดันนี้เป็นเวลา10นาที ระหว่างนี้มีการลดความดันเป็นศูนย์ทุก ๆ 2 นาทีเพื่อขับไล่อากาศ 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, L₀)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)และระยะยืดที่ขาดมากที่สุดในการสูตรที่2 แต่ค่าโมดูลัสที่300%มากที่สุดในการสูตรที่3 ยางผสมB3(50/50 NR/SBR) แสดงความแข็งแรงมากที่สุดในสูตรที่1และระยะยืดที่ขาดมากที่สุดในการสูตรที่2 ยางผสมB6(50/50 NR/ULDPE) แสดงความแข็งแรงมากที่สุดและระยะยืดที่ขาดน้อยที่สุดในสูตรที่2 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

จากการเปรียบเทียบสูตรทั้งสามระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณพบว่า โดยส่วนใหญ่แล้วค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าความแข็งแรงที่จุดขาดของยางผสมทั้งสองชนิดในสูตรที่สองที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าสูตรอื่นๆ

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

3.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

การพิจารณาสูตรที่เหมาะสมใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึดเป็นดัชนีชี้วัด เนื่องมาจากการที่ULDPEไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ได้และมียางผสมบางตัวมีสัดส่วนถึง50%(B6) วิธีการนี้ค่อนข้างจะแตกต่างกับการใช้ทั่วไป ถ้าพิจารณาผลการทดลองโดยไม่มีการเปรียบเทียบค่าที่

ได้จากการคำนวณ จะมีการก้ำกึ่งกันระหว่างสูตรที่1และสูตรที่2ในกรณีที่พิจารณาคุณสมบัติของยางผสม แต่ถ้าเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี สูตรที่2ของยางผสมทั้งสองชนิดจะมีความแข็งแรงที่จุดขาดสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าสูตรอื่นๆ และค่าคุณสมบัติที่เหลือก็สูงกว่าค่าที่คำนวณได้ จึงสรุปว่าสูตรที่2นี้ (กรดสเตียริก 2phr, วัลคาไนซ์ที่ 140°C.) ให้คุณสมบัติยางผสมที่ดีที่สุด 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 โดยการสังเกตด้วยตา ในระหว่างการผสม และค่าความเบี่ยงเบนจากคุณสมบัติที่วัดได้

จากการทดลองสรุปได้ว่า สูตรที่2เหมาะสมมากที่สุดในการเตรียมยางผสม ULDPEมีลักษณะยืดหยุ่นใกล้เคียงอีลาสโตเมอร์พอลิเมอร์ และสามารถผสมได้ดีกับยางธรรมชาติ

3.2 การทดลองที่ 2 : 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. หยดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช้าๆทีละหยด ปริมาตร 3 มิลลิลิตร
6. เติมน้ำกลั่นเพื่อให้ของผสมมีปริมาตรทั้งหมด 150 มิลลิลิตร ปิดฝาขวด นำไปวางบนเครื่องให้ความร้อนพร้อมกวนของผสมตลอดเวลา อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 30°C, 40°C. และ 50°C.
7. ปิเปตของผสมในข้อ 6 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง
8. นำส่วนที่ปิเปตจากข้อ 7 ตกตะกอนด้วยเมทานอลอย่างช้าๆ จะได้ตะกอนของยางธรรมชาติเหลวออกมา
9. นำยางธรรมชาติเหลวที่เตรียมได้มากรองโดยวิธีลดความดัน นำสารที่กรองได้วางทิ้งไว้คืน แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ
10. นำยางธรรมชาติเหลวที่ได้ชั่งน้ำหนัก และวัดความหนืด(intrinsic viscosity) ด้วย Ubbelohde viscometer ใช้โหลอื่นเป็นตัวทำละลาย ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องที่ความเข้มข้นต่างๆ (ไม่เกิน 1 %w/v) วัดเวลาที่ใช้ในการไหลของสารละลายและตัวทำละลายเมื่อผ่านระยะทางที่กำหนดไว้สามครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ ทำการวัดความหนืดสองครั้ง

3.2.3 ผลการทดลอง

ยางธรรมชาติเหลวจะมีลักษณะเหลวมากขึ้นตามลำดับ เมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง(ข้อ 6)เพิ่มขึ้น การเตรียมที่อุณหภูมิ 30°C. ในเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ยางธรรมชาติเหลวมีลักษณะเหนียวติดมือ การเตรียมที่อุณหภูมิ 50°C. ในเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ยางธรรมชาติเหลวมีลักษณะเหนียวชั้นติดภาชนะ ยางธรรมชาติเหลวที่เตรียมได้มีสีเหลืองอมส้มและใส แต่เมื่อนำไปอบ

ในอุณหภูมิกาศที่อุณหภูมิ 35°C. เป็นเวลา 1 วัน จะมีลักษณะขุ่นขาวในบางส่วน อย่างธรรมชาติ เหลวที่เตรียมได้ทั้งหมดไม่สามารถเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มโดยวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดและโดยการระเหยของตัวทำละลาย

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

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

เมื่อ t คือเวลาที่สารละลายอย่างธรรมชาติเหลวในโหลอื่นไหล

t_0 คือเวลาที่โหลอื่นไหล

c คือความเข้มข้นของสารละลายอย่างธรรมชาติเหลวในโหลอื่น

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 เป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในแง่ความสะดวกต่อกระบวนการผสมและการแปรรูป 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 แล้วจึงเติมสารเคมีต่างๆ(สูตรที่2) หรือผสมNRกับLNRให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อน แล้วจึงผสมULDPEและสารเคมีลงไปตามวิธีการเตรียมยางคอมปาวด์ (หัวข้อ2.3)
3. ทดสอบคุณสมบัติการดึงยึด (ดูหัวข้อ2.4-ข้อ8)

3.3.3 ผลการทดลอง

เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติเหลวที่เหนียวเหนอะหนะ เพราะมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงมาก ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ คือ เหนียวติดภาชนะจนแกะออกไม่หมด หรือเหนียวติดลูกกลิ้งของเครื่องผสม ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติเหลวที่สังเคราะห์ขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง เพื่อให้สะดวกต่อการผสม ถึงกระนั้นก็ตาม ทั้งLNR1และLNR2ก็ยังสร้างปัญหาในกระบวนการผสม 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 ปริมาณของซัลเฟอร์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบโดยตรงกับคุณสมบัติ อาจทำให้การเปรียบเทียบผิดไป เนื่องจากต้องการใช้ยางธรรมชาติเหลวเป็นcompatibilizerเท่านั้น มิได้ต้องการเพิ่มเนื้อยางให้มากขึ้น ดังนั้น จึงไม่นำน้ำหนักของยางธรรมชาติเหลวในการคิดปริมาณการใช้สารเคมี นอกจากนี้

คุณสมบัติความเป็นยางของยางธรรมชาติเหลวก็น้อยลงไป เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดให้สั้นลง และพันธะคู่ถูกทำลายไประหว่างการทำปฏิกิริยา ฉะนั้นซัลเฟอร์ที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของNR มีส่วนน้อยหรือไม่มีเลยที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเหลว

การเติมยางธรรมชาติเหลวมีได้ทำให้ยางผสมNR/ULDPE แข็งแรงขึ้น ถึงแม้จะทำให้ดึงยึดได้มากขึ้นก่อนการขาด แต่คุณสมบัติโดยรวมมีได้ดีขึ้น มีได้ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างNRและULDPEให้ดีขึ้น (ยางผสมNR/ULDPEเป็น compatible blend) และยังทำให้กระบวนการผสมยุ่งยากมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว สรุปได้ว่ายางผสมNR/ULDPEไม่ต้องอาศัยยางธรรมชาติเหลวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ยางธรรมชาติเหลวไม่ได้เป็นcompatibilizerให้กับยางผสมNR/ULDPE ต่างจากยางผสมNR/HDPE¹และยางผสมNR/LLDPE¹ ที่คณะวิจัยระบุว่ายางธรรมชาติเหลวช่วยเพิ่มการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม และทำให้คุณสมบัติดึงยึดของยางผสมดีขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากHDPEและLLDPEมีลักษณะเป็นพลาสติก ส่วนULDPEมีลักษณะเป็นอีลาสโตเมอร์มากกว่า ทำให้ULDPEมีความเหมือนกับNRมากกว่า ULDPEจึงเข้ากันกับNRได้ดีกว่าHDPEและLLDPE ดังนั้นการวิจัยนี้จึงไม่มีการเติมยางธรรมชาติเหลวหรือcompatibilizerใดๆลงในยางผสมNR/ULDPE

¹ [1] S. Ahmad 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

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติการดึงยึด (Tensile properties) ของ NR SBR ULDP E ยางผสม NR/SBR และยางผสม NR/ULDP E ที่เตรียมจากสูตรที่ 1-สูตรที่ 3

Sample	Tensile Strength (MPa)	Modulus @ 300% ¹ (MPa)	Elongation at break (%)	
			L ₀ = 35 mm	L ₀ = 65 mm
NR				
สูตรที่ 1	24.61 ± 3.17 ³	1.54 ± 0.07	1350 ± 145	727 ± 72
สูตรที่ 2	18.18 ± 1.80	0.94 ± 0.05	1750 ± 48	942 ± 24
สูตรที่ 3	14.92 ± 3.45	0.80 ± 0.13	1667 ± 81	898 ± 40
SBR				
สูตรที่ 1	1.94 ± 0.06	0.93 ± 0.07	719 ± 40	387 ± 20
สูตรที่ 2	2.42 ± 0.27	0.77 ± 0.26	1055 ± 285	568 ± 140
สูตรที่ 3	2.36 ± 0.28	1.15 ± 0.08	686 ± 84	369 ± 42
ULDP E	10.27 ± 0.22	2.60 ± 0.04	1456 ± 19	784 ± 10
B3				
สูตรที่ 1	13.29 ± 2.50	1.44 ± 0.18	1269 ± 197	683 ± 90
สูตรที่ 2	13.01 ± 2.50	0.98 ± 0.02	1529 ± 33	823 ± 14
สูตรที่ 3	8.71 ± 3.52	1.14 ± 0.15	1197 ± 104	645 ± 53
B6				
สูตรที่ 1	16.60 ± 1.70	1.71 ± 0.14	1678 ± 23	904 ± 12
สูตรที่ 2	17.82 ± 2.80	1.72 ± 0.02	1629 ± 22	877 ± 11
สูตรที่ 3	14.12 ± 2.73	1.66 ± 0.12	1638 ± 53	882 ± 57
ค่าที่ได้จากการคำนวณ				
B3				
สูตรที่ 1	13.28	1.24	1035	557
สูตรที่ 2	10.30	0.86	1400	755
สูตรที่ 3	8.64	0.98	1177	634
B6				
สูตรที่ 1	17.44	2.07	1403	756
สูตรที่ 2	14.23	1.77	1603	863
สูตรที่ 3	12.60	1.70	1608	841

¹ ใช้ L₀ เท่ากับ 35 มม. ในการคำนวณ

ตารางที่ 3.4 ค่า Intrinsic 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

ตารางที่ 3.5 ค่า Intrinsic 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

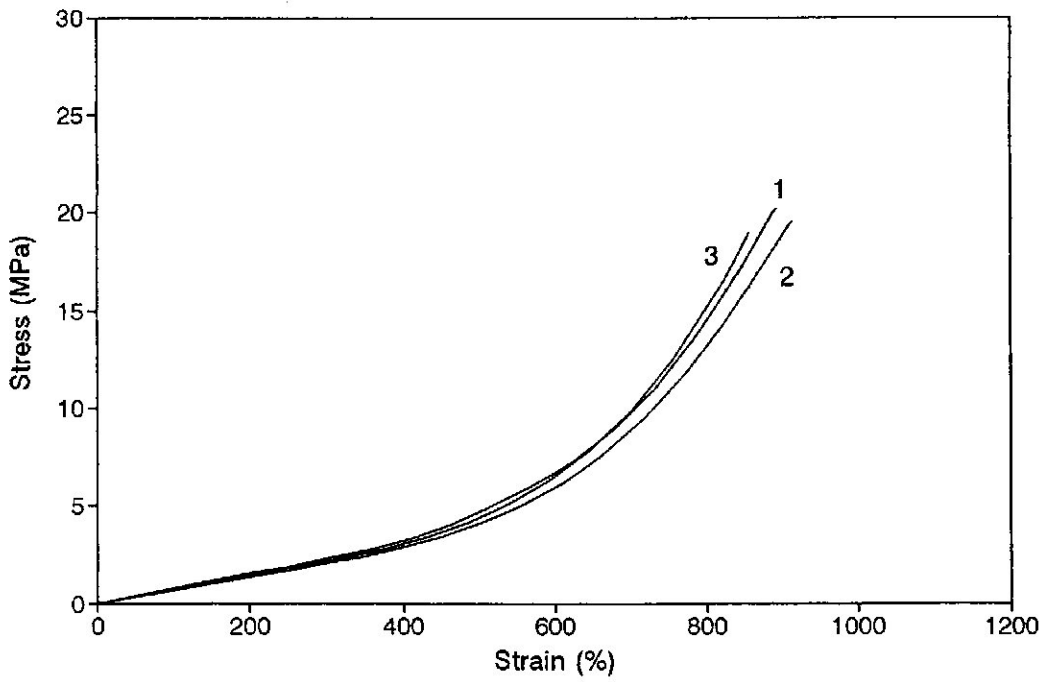
² เวลาในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

³ อุณหภูมิในการเตรียมยางธรรมชาติเหลว

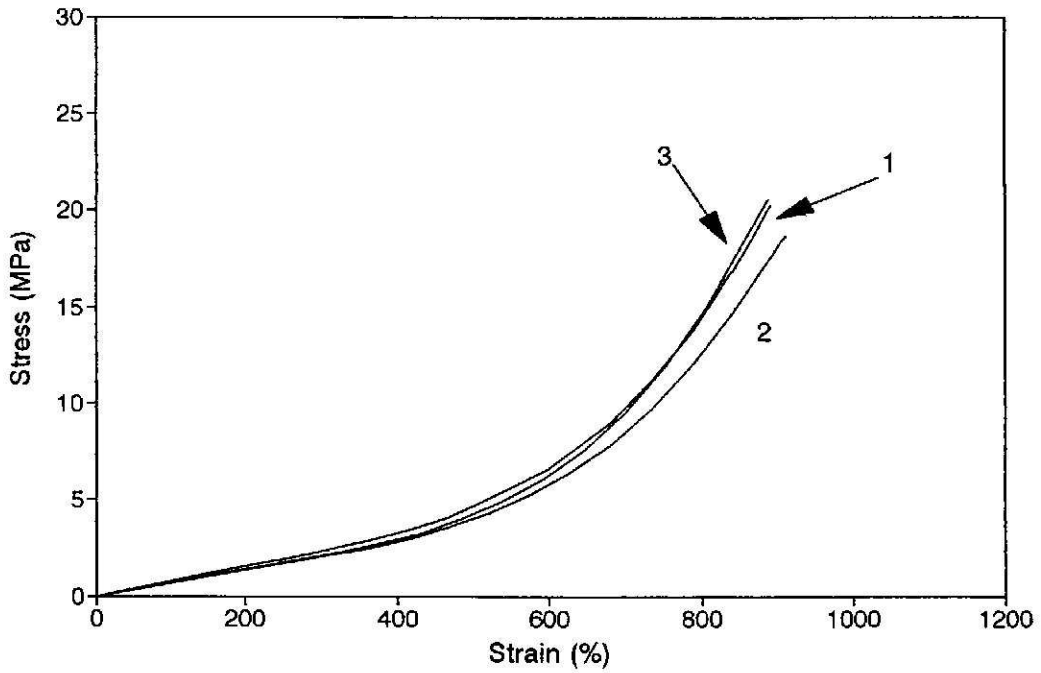
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติดึงยึด (Tensile properties) ของ NR และยางผสม NR/ULDPE ที่มียางธรรมชาติเหลวประกอบ

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 + ULDP (70:30)	22.72 ± 1.21	972 ± 25
NR + ULDP + LNR1 (70:30:5)	18.96 ± 1.17	852 ± 20
NR + ULDP + LNR1 (70:30:10)	20.59 ± 1.46	902 ± 10
NR + ULDP + LNR1 (70:30:15)	17.55 ± 0.76	928 ± 45
NR + ULDP + LNR1 (70:30:20)	17.10 ± 1.04	927 ± 29
NR + ULDP + LNR2 (70:30:5)	18.99 ± 1.54	903 ± 30
NR + ULDP + LNR2 (70:30:10)	18.69 ± 0.89	896 ± 34
NR + ULDP + LNR2 (70:30:15)	19.39 ± 0.58	996 ± 50
NR + ULDP + LNR2 (70:30:20)	18.46 ± 1.39	1010 ± 33

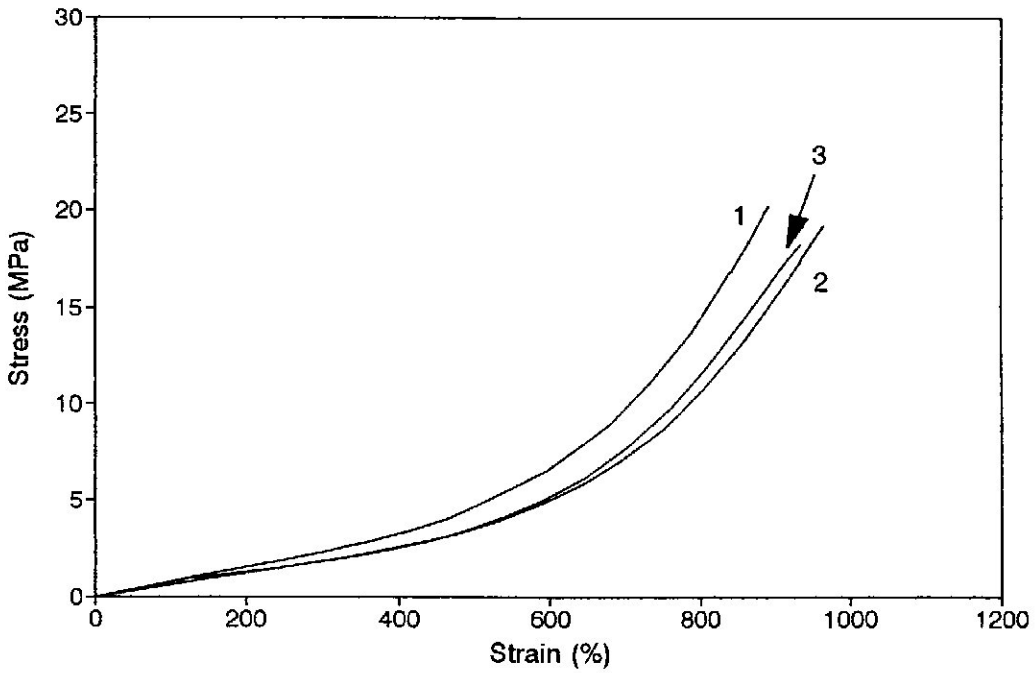
¹ อัตราส่วนโดยน้ำหนัก



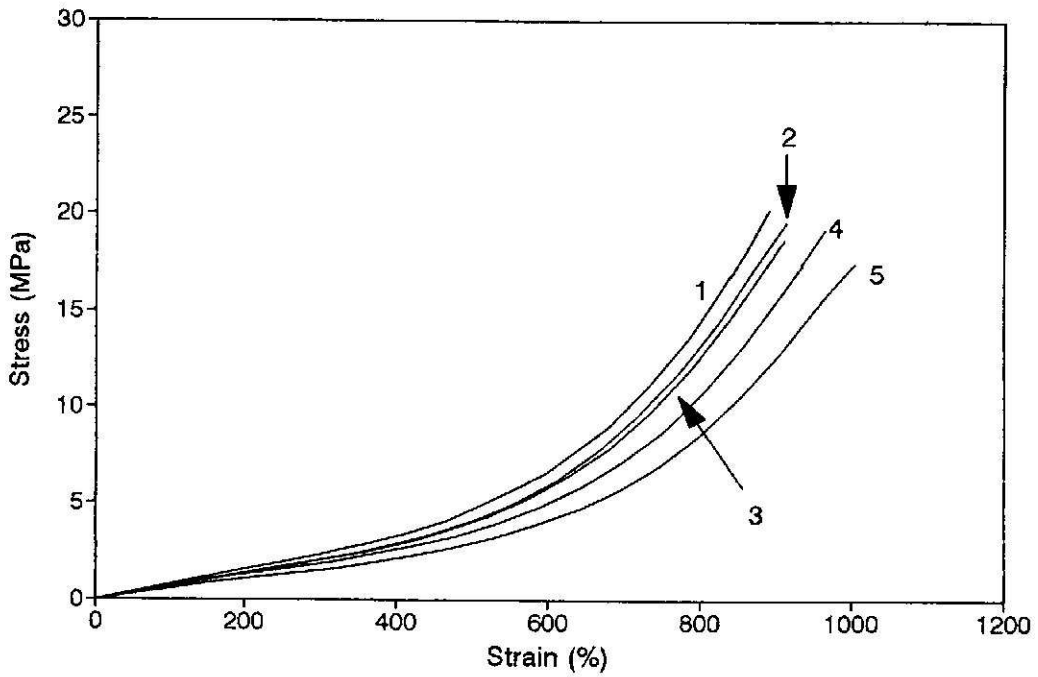
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 5%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 5%



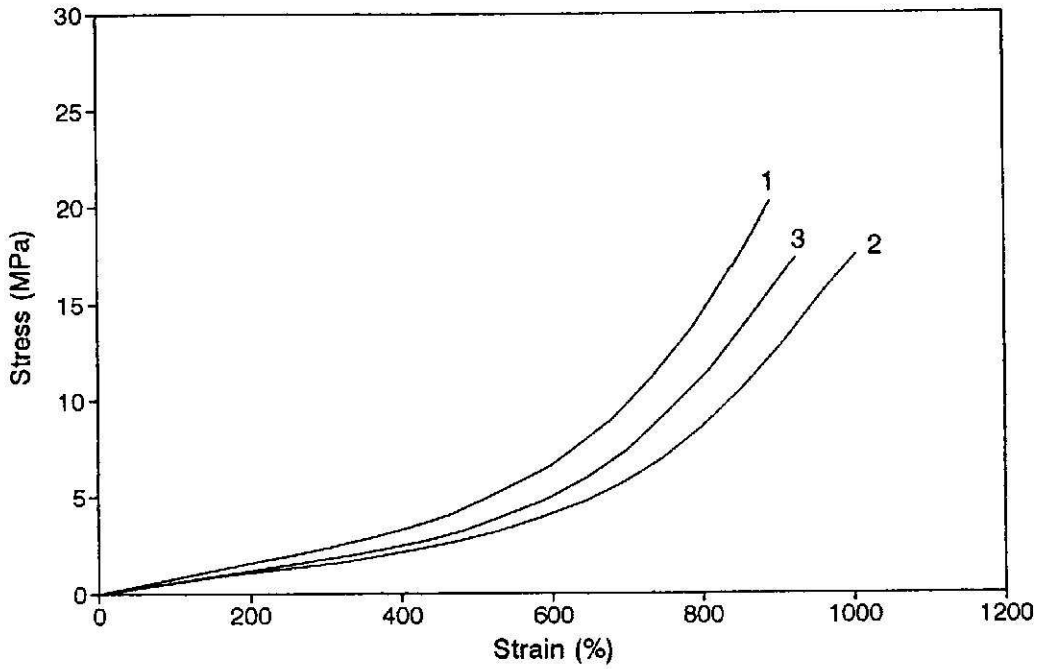
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 10%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 10%



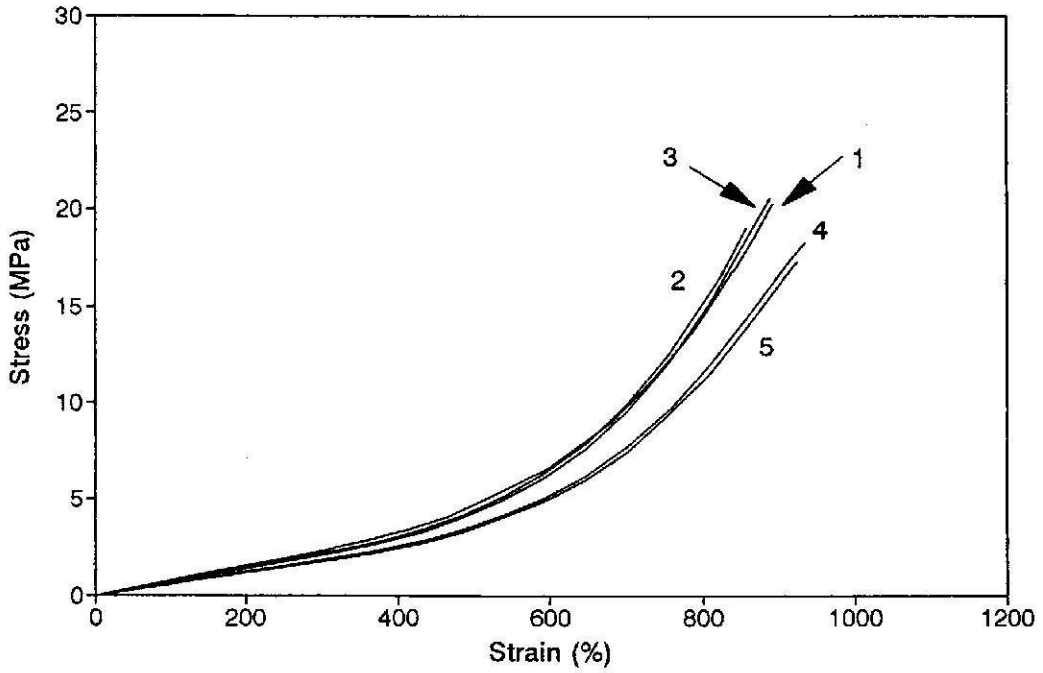
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); (2) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 15%; (3) ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR2 15%



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด : (1) ยางผสมNR/ULDPE (70/30); ยางผสมNR/ULDPE (70/30) ที่เติมLNR1 (2) 5%; (3) 10%; (4) 15%; (5) 20%



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 3.6 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 : คุณสมบัติการดึงยึด(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) ยกเว้นชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อการหักงอจะมีปริมาณซัลเฟอร์มากขึ้นเล็กน้อย(2.5 phr) เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งมากพอต่อการทดสอบ ทำให้สามารถสังเกตความแตกต่างของยางผสมได้ วิธีการเตรียมยางคอมปาวด์อธิบายในบทที่2 (หัวข้อ2.3) ยางคอมปาวด์เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องหนึ่งคืน ก่อนนำไปวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัดให้ได้แผ่นซีทหนา1มม.และ3มม. และชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ

รายละเอียดของการทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่2 หัวข้อ2.4

4.2.2 การทดสอบคุณสมบัติการดึงยึด

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) ชึ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

4.2.6 การทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D430 ชึ้นงานหนา 7 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง จำนวน3ชั้น ต่อ1ตัวอย่าง เนื่องจากสูตรที่2ซึ่งใช้ซัลเฟอร์เพียง2phr ทำให้ชึ้นงานยืดหยุ่นมากเกินไปและไม่เกิดรอยแตกเลยเมื่อทำการทดสอบเป็นเวลานาน (มากกว่า 200,000 รอบ) ดังนั้นจึงมีการใช้ซัลเฟอร์มากขึ้น คือ 2.5phr โดยคงอัตราส่วนของสารเคมีตัวอื่นๆไว้ ทำการทดสอบจำนวน100,000รอบ

4.2.7 การทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3389 ชึ้นงานหนา 3 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

4.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง

4.3.1 คุณสมบัติการดึงยืด

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves) ของ NR SBR ULDPPE และยางผสม (B1 -B6) แสดงในรูปที่4.1-รูปที่4.9 ตามลำดับ และค่าคุณสมบัติการดึงยืดต่างๆสรุปในตารางที่4.1 รูปดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของผลการทดลอง(reproducibility) มีการเบี่ยงเบนของผลการทดลองเล็กน้อย ชึ้นทดสอบแต่ละชั้นแสดงคุณสมบัติเหมือนกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่มีนัยสำคัญ รูปที่4.10แสดงการเปรียบเทียบกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของวัตถุดิบเริ่มต้น (NR SBR และ ULDPPE) รูปร่างกราฟของNRที่แสดงในรูปนี้ เหมือนกับNRทั่วไป คือต้องใช้แรงดึงสูงมากขึ้นเมื่อถูกดึงยืดมากขึ้นเพราะเกิดเป็นผลึก(strain-induced crystallization) ในขณะที่โมดูลัสช่วงแรกๆยังต่ำอยู่มาก ระยะยืดที่จุดขาดก็อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของNR เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่า SBRเป็นยางที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าNRมาก ระยะยืดที่จุดขาดเป็นครึ่งหนึ่งของNR รูปร่างของกราฟคล้ายกับNRในช่วงระยะยืดที่เท่าๆกัน คุณสมบัติของSBRที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไป รูปร่างกราฟของULDPPEแตกต่างจากยางทั้งสองชนิด ULDPPEมีโมดูลัสเริ่มแรกสูงมาก ค่าโมดูลัสของULDPPEมีค่าสูงกว่าNRตั้งแต่เริ่มดึงไปจนถึงที่ระยะยืด500% ULDPPEมีค่าความแข็งแรงที่จุดขาด(tensile strength)ต่ำกว่าNRมากพอสมควร แต่มีระยะยืดที่จุดขาด(elongation at break)ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4.11และรูปที่4.12เป็นกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของยางผสมNR/SBRและ NR/ULDPPE โดยเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้นตามลำดับ รูปร่างกราฟของยางผสมNR/SBRมีลักษณะใกล้เคียงกับNR ถึงแม้ว่าจะมี SBRอยู่ในปริมาณเท่าๆกันกับNR แสดงว่ายางผสมNR/SBRแสดงพฤติกรรมหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะถูกดึงยืดเช่นเดียวกับNR ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด600%(E_{600%})มีทิศทางเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ในขณะที่ค่าความแข็งแรงที่จุดขาด ค่าโม

คูลิสที่ระยะยืด300%(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 นอกจากนี้ผลการทดลองที่มีค่าreproducibilityสูงของยางผสมชนิดนี้ มีส่วนสนับสนุนในการจัดเป็น compatible blend ส่วนยางผสมNR/SBRนั้น จะให้ค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จาก Rule of Mixture และเป็นที่น่าทึ่งที่ทราบว่า ยางผสมNR/SBRนี้เป็น compatible blend นอกจากนี้ค่าreproducibilityนี้บ่งบอกความสม่ำเสมอของผลการทดลอง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการผสมที่ให้ส่วนผสมกระจายสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างยางผสมสองชนิดนี้พบว่า 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 จะมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดสูงมากในช่วงตั้งยึดต่ำ 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 ซึ่งแนะนำสูตรที่ใช้ในการเตรียมยางครั้งนี้(สูตรที่2ในตารางที่3.2) อาจมีซัลเฟอร์น้อยไป 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 ดังนั้นULDPEไม่มีผลอย่างเป็นทางการกระดอนของNR 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) ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการทดสอบสั้นลงและเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน 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 ความต้านทานต่อการขีดถู

จากการทดลองวัดความต้านทานต่อการขีดถูด้วยเครื่องTaberของยางธรรมชาติที่เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในตารางที่3.2 พบว่า ยางนึ่มเกินไป ทำให้ยางติดลูกกลิ้งเมื่อทำการขีดถูไปได้ 1,000 รอบ ไม่สามารถทำการทดสอบต่อไปได้ ดังนั้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสูตรยางใหม่เพื่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้นและเหมาะสมต่อการหาค่าความต้านทานต่อการขีดถู ค่าความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมที่เตรียมโดยสูตรปรับปรุงใหม่ 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. สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ใน(สูตรที่2ในบทที่3) ไม่เหมาะสมต่อการทดสอบความต้านทานต่อการขีดถู

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการดึงยึด (Tensile properties) ของ NR SBR ULDPPE ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPPE (B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่ 2 ใน บทที่ 3)

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
ULDPPE	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 L_0 เท่ากับ 65 มม.

* ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

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

Sample	Tear Resistance (kN/m)	
	Experiment	Calculation
NR	29.1 ± 1.2	-
SBR	7.7 ± 0.6	-
ULDPPE	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/ULDPPE(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

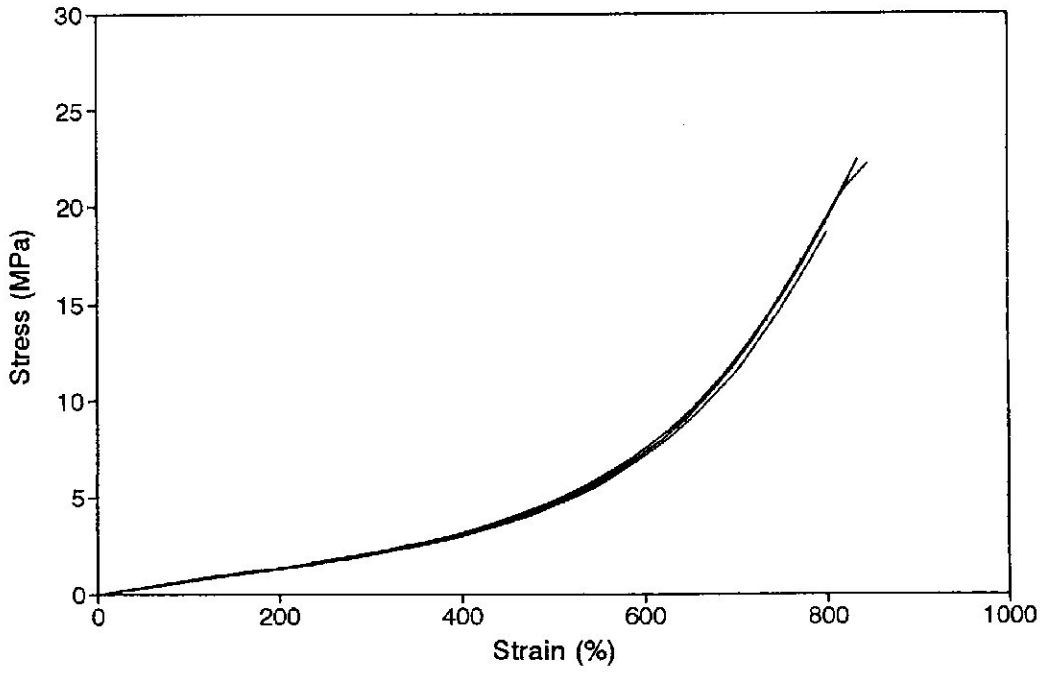
(ความแข็งของULDPPEเท่ากับ 75)

ตารางที่ 4.4 ค่าการกระดอน(Resilience)ของNR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3)

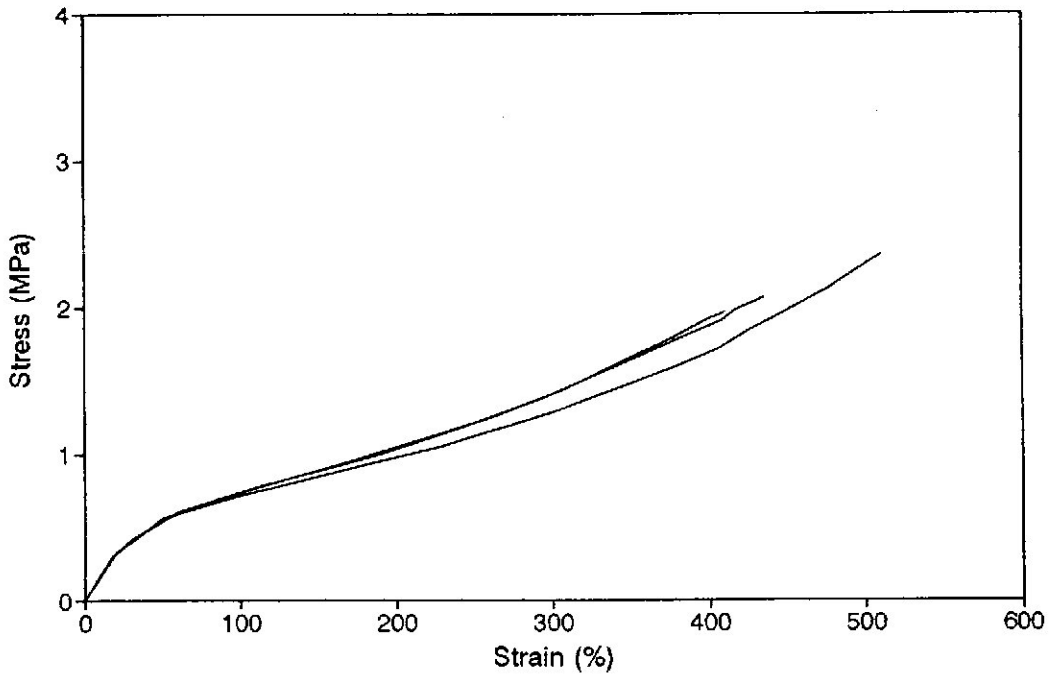
Sample	Resilience (%)	
	Test #1	Test #2
NR	65.88 ± 0.36	66.74 ± 0.18
B1	63.84 ± 0.57	66.14 ± 0.24
B2	63.30 ± 0.29	65.16 ± 0.27
B3	62.14 ± 0.38	64.12 ± 0.51
B4	63.96 ± 0.48	64.84 ± 0.38
B5	61.54 ± 0.61	62.62 ± 0.40
B6	60.86 ± 0.56	61.78 ± 0.44

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานต่อการหักงอ(Flex cracking resistance)ของยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (เตรียมโดยใช้สูตรที่2ในบทที่3 แต่เพิ่มปริมาณซัลเฟอร์เป็น 2.5 phr)

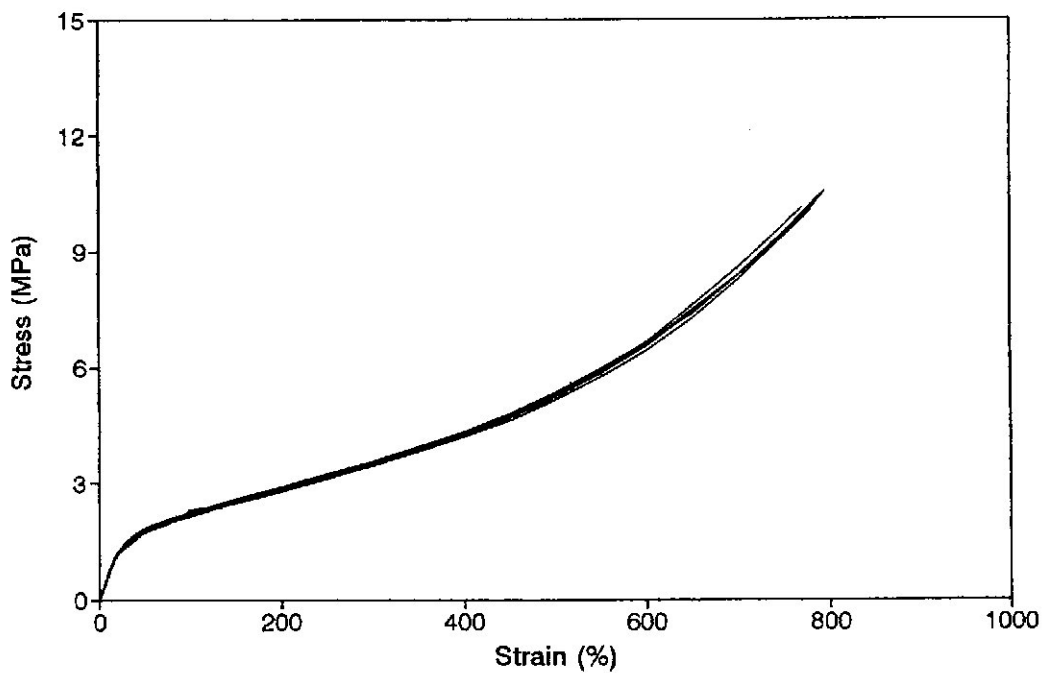
Sample	No. of cycles	Results
B1	100,000	ไม่เห็นรอยแตก
B2	100,000	ไม่เห็นรอยแตก
B3	100,000	ไม่เห็นรอยแตก
B4	85,000	เห็นรอยแตก
B5	100,000	ไม่เห็นรอยแตก
B6	65,000	เห็นรอยแตก



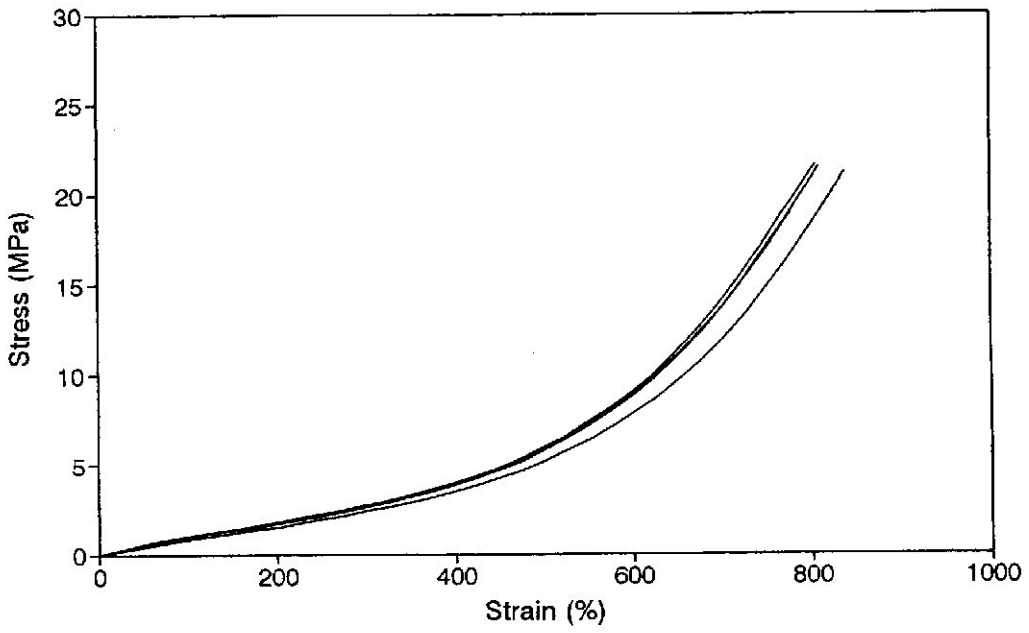
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ NR ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



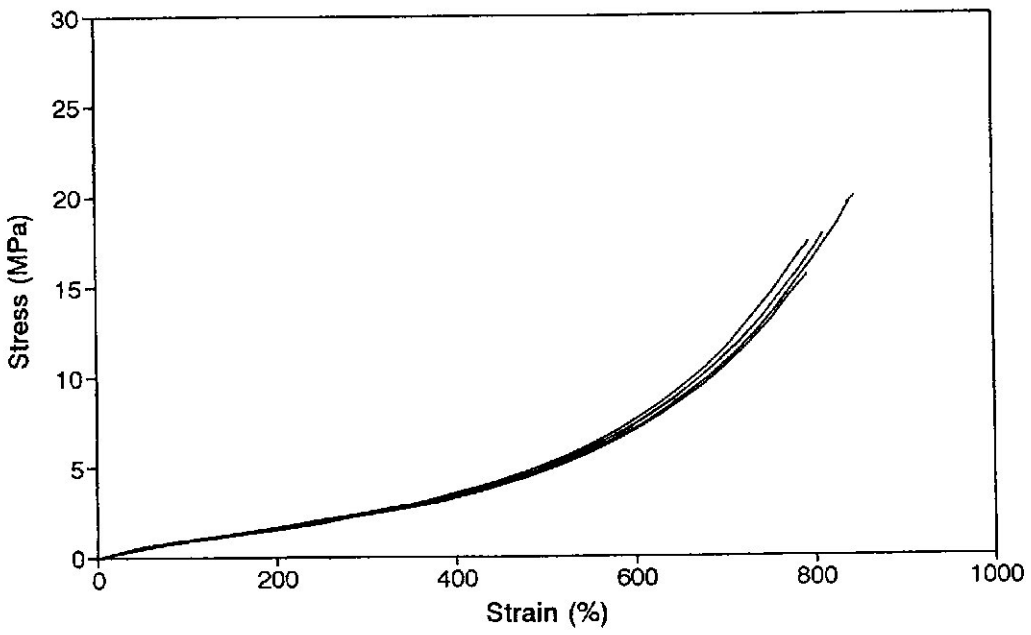
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ SBR ทดสอบด้วย อัตราเร็ว 500 มม./นาที



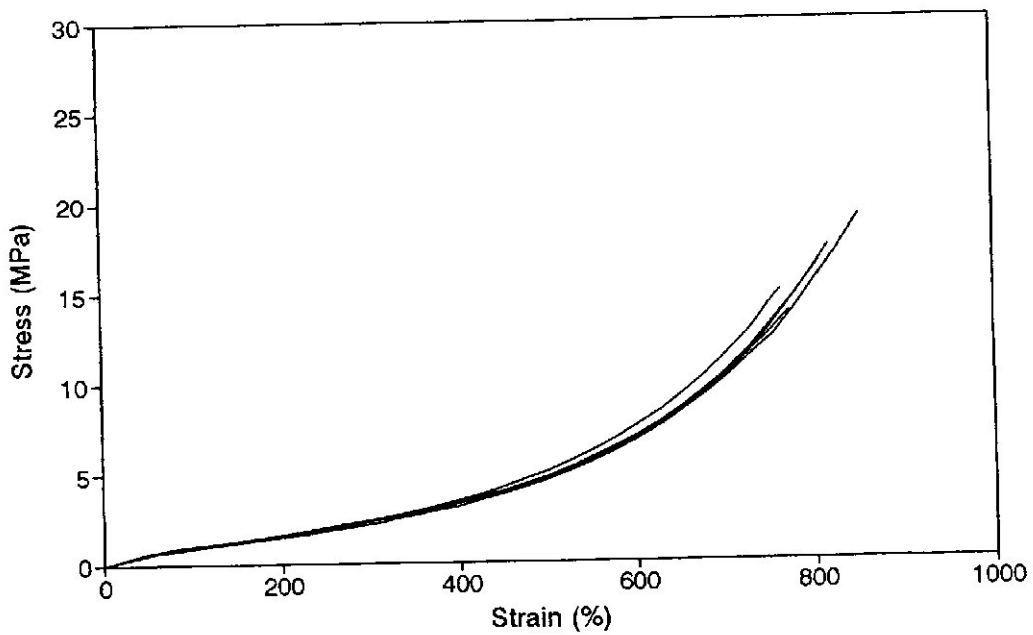
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ ULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



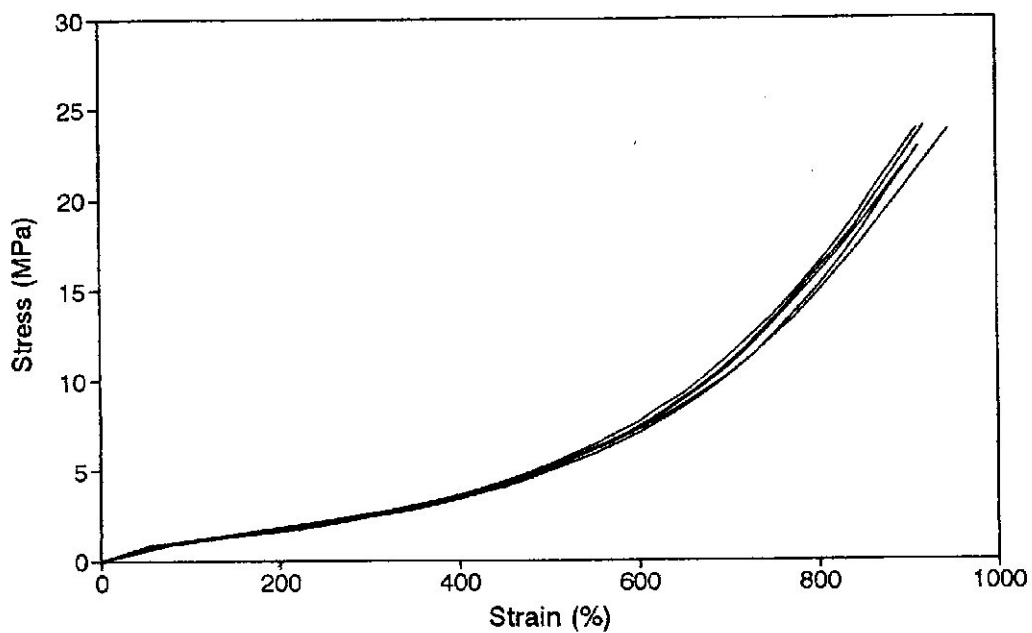
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ B1 (30% SBR) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



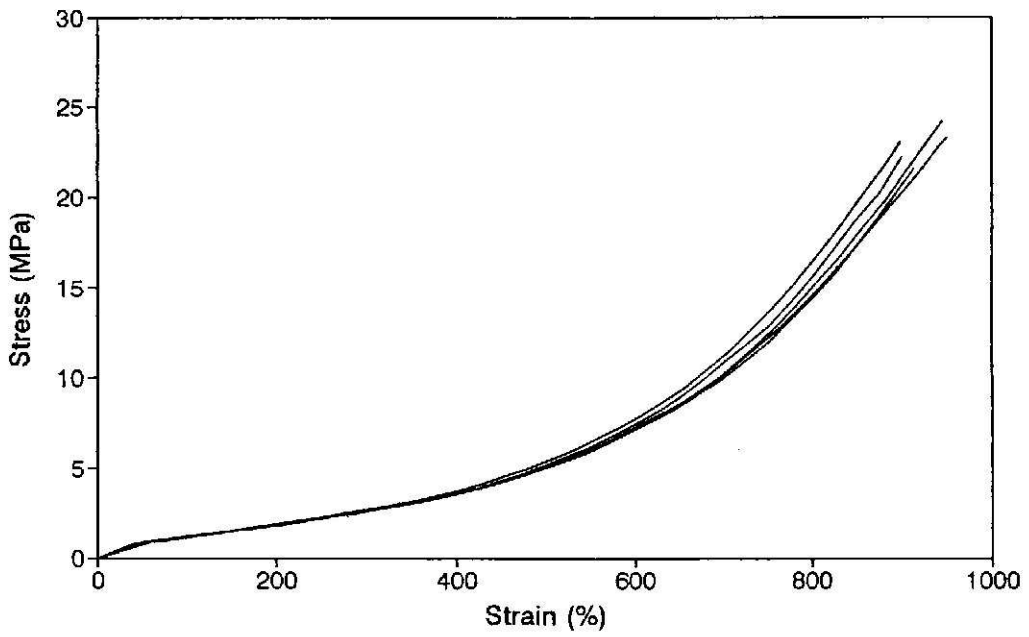
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ B2(40% SBR) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



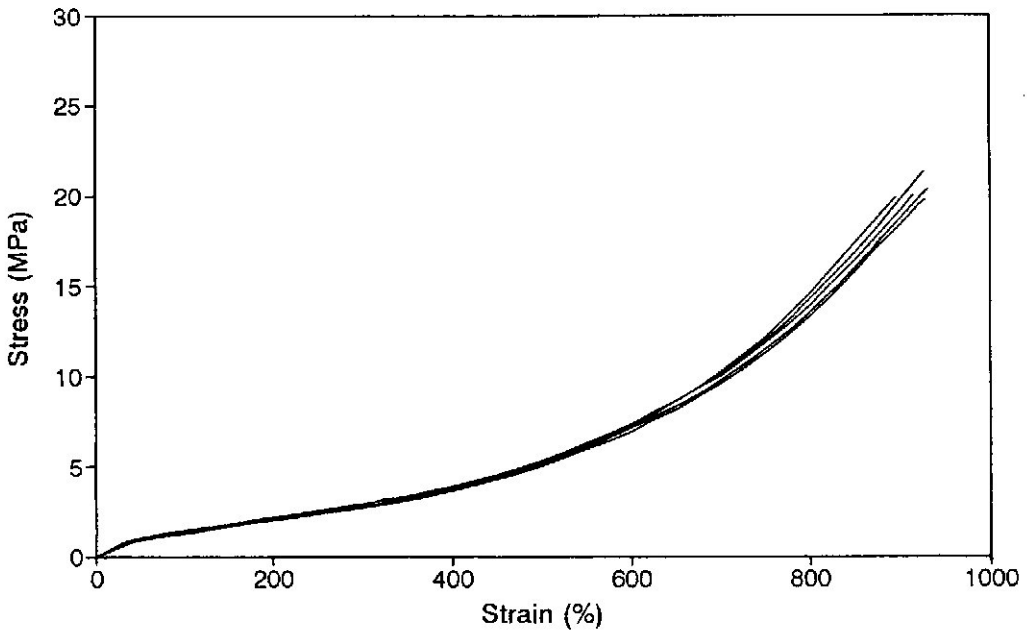
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB3(50%SBR) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



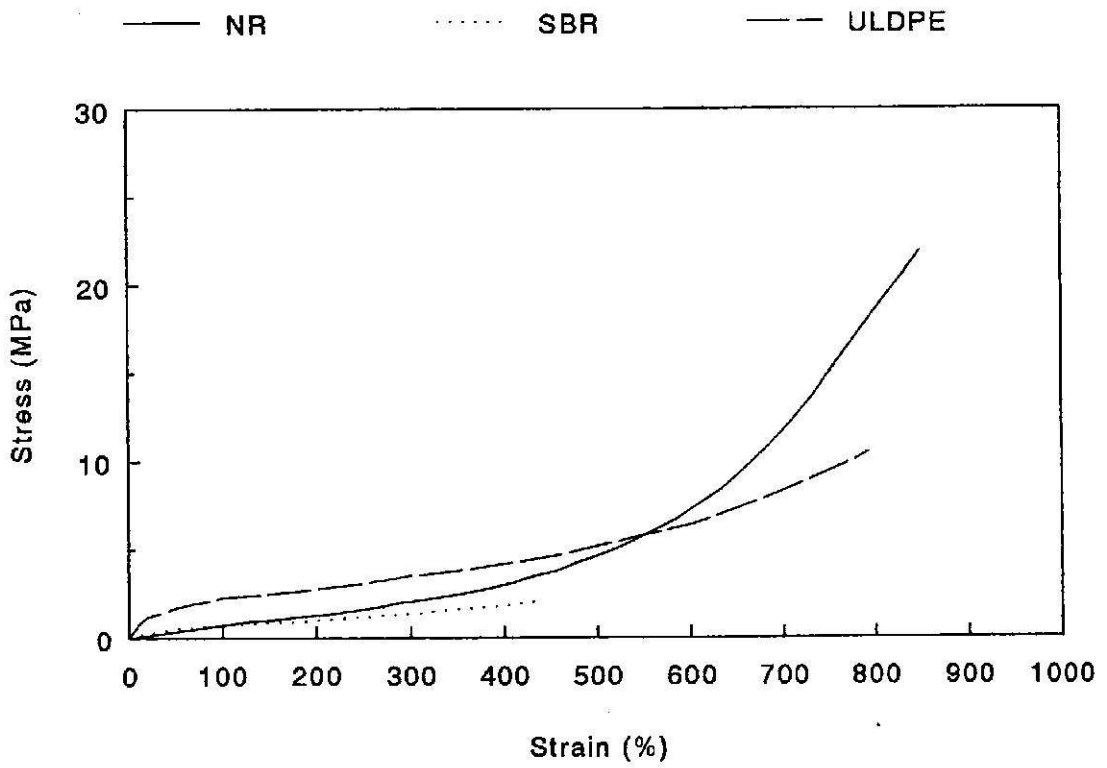
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ B4(30%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของB5(40%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

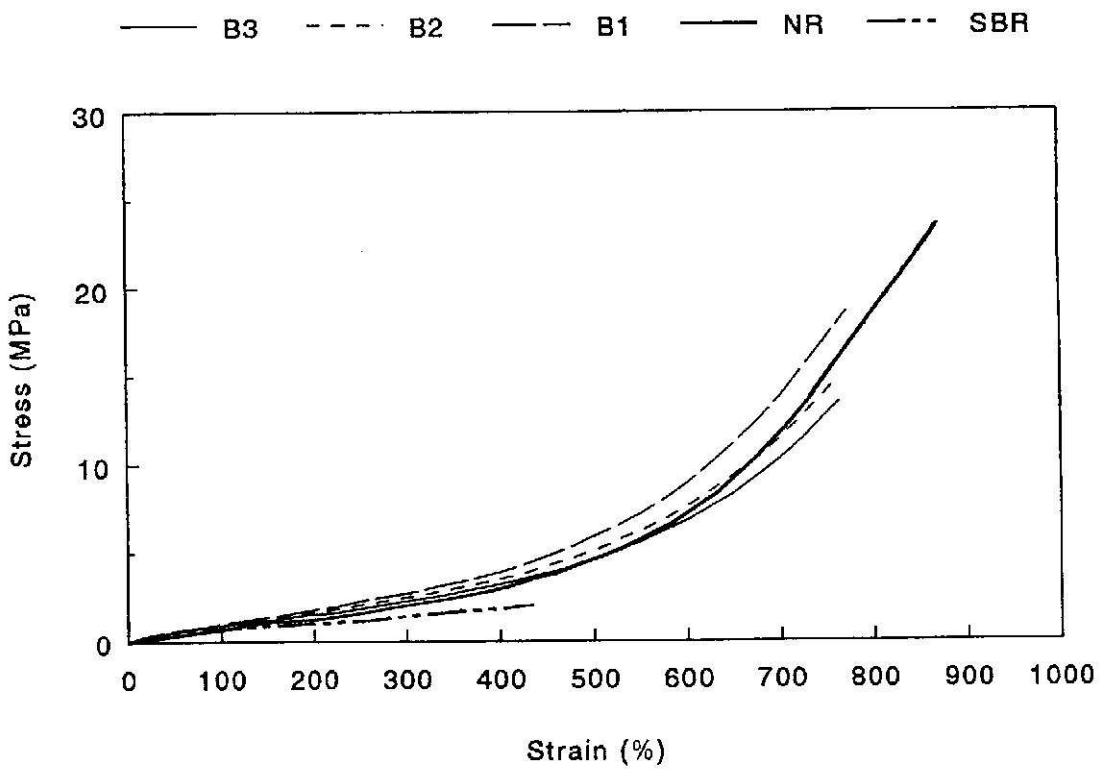


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ B6(50%ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



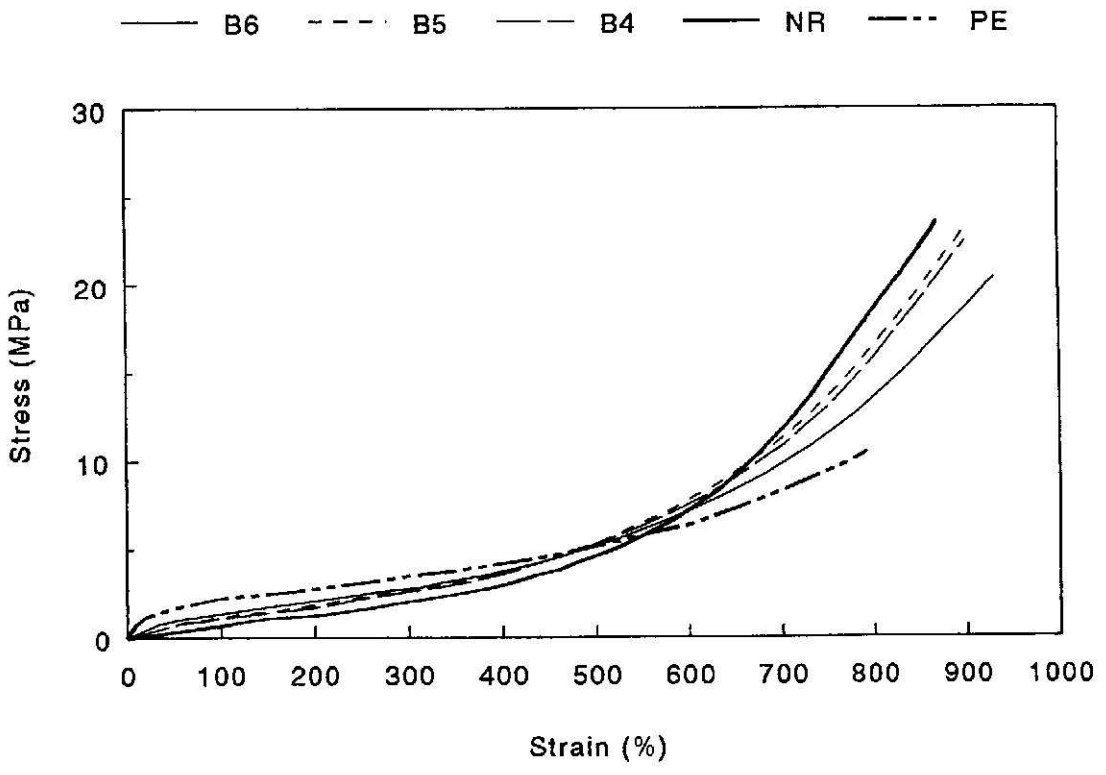
รูปที่ 4.10

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR SBR และULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



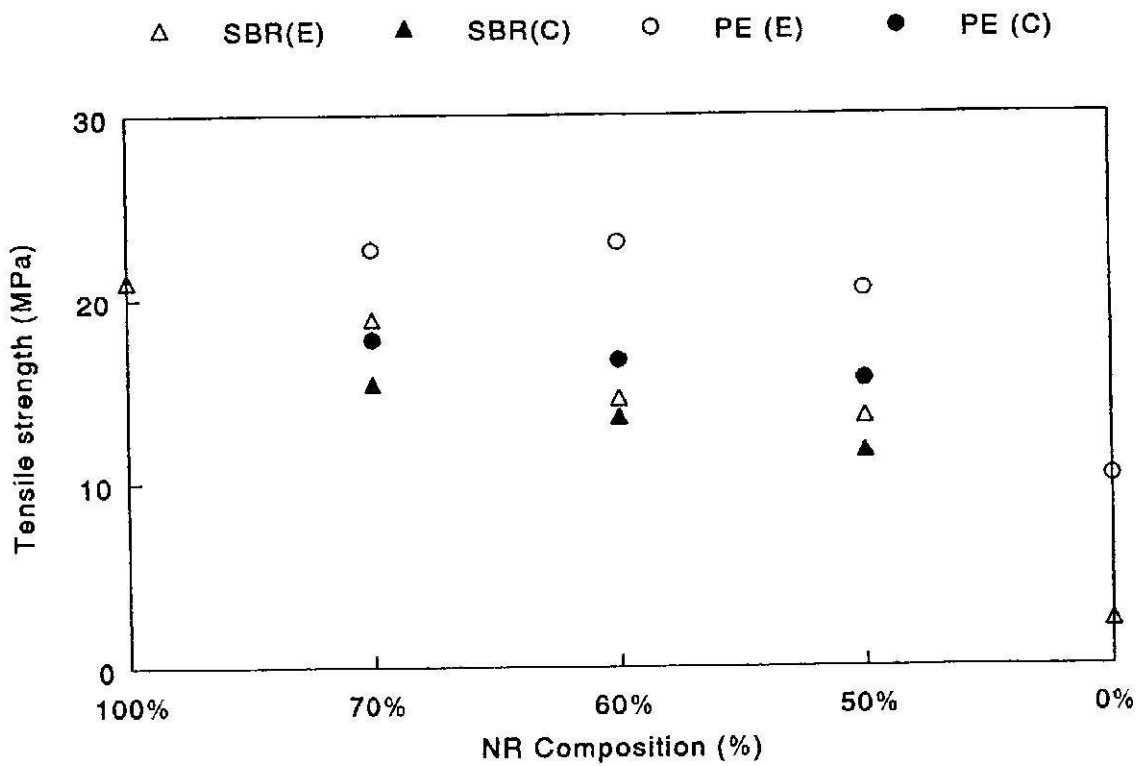
รูปที่ 4.11

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ NR SBR และ B1-B3 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

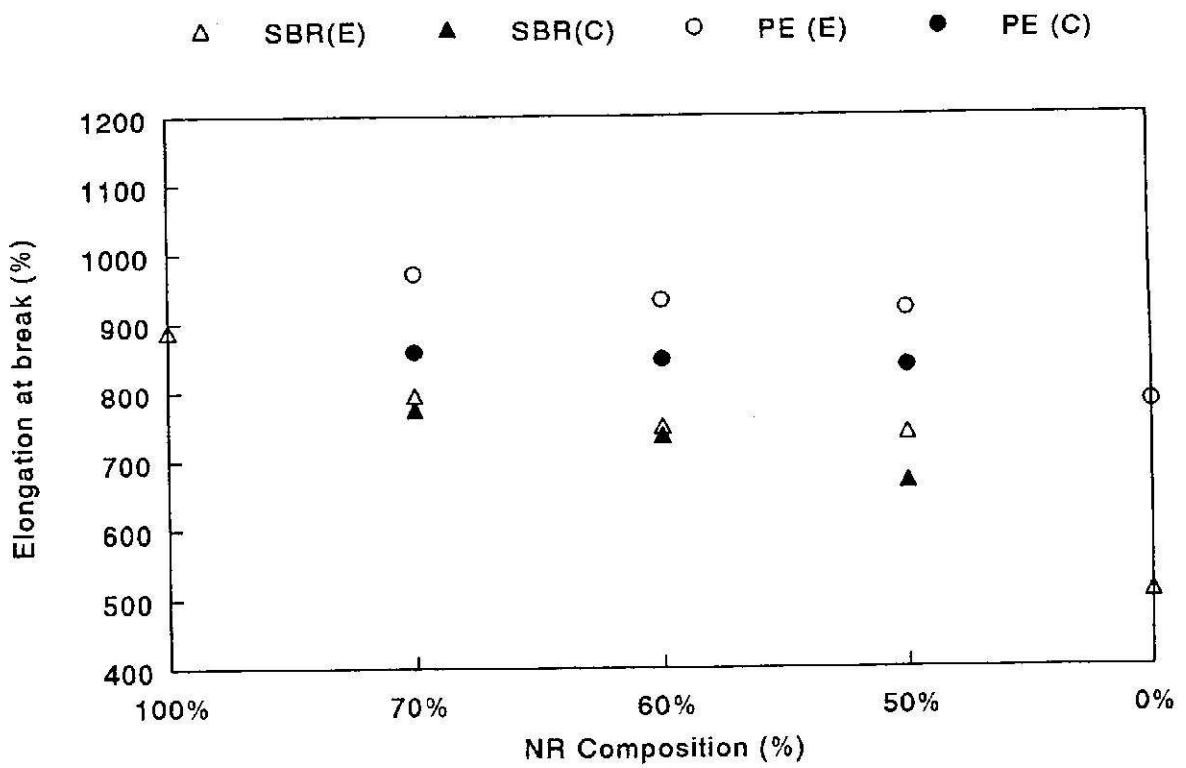


รูปที่ 4.12

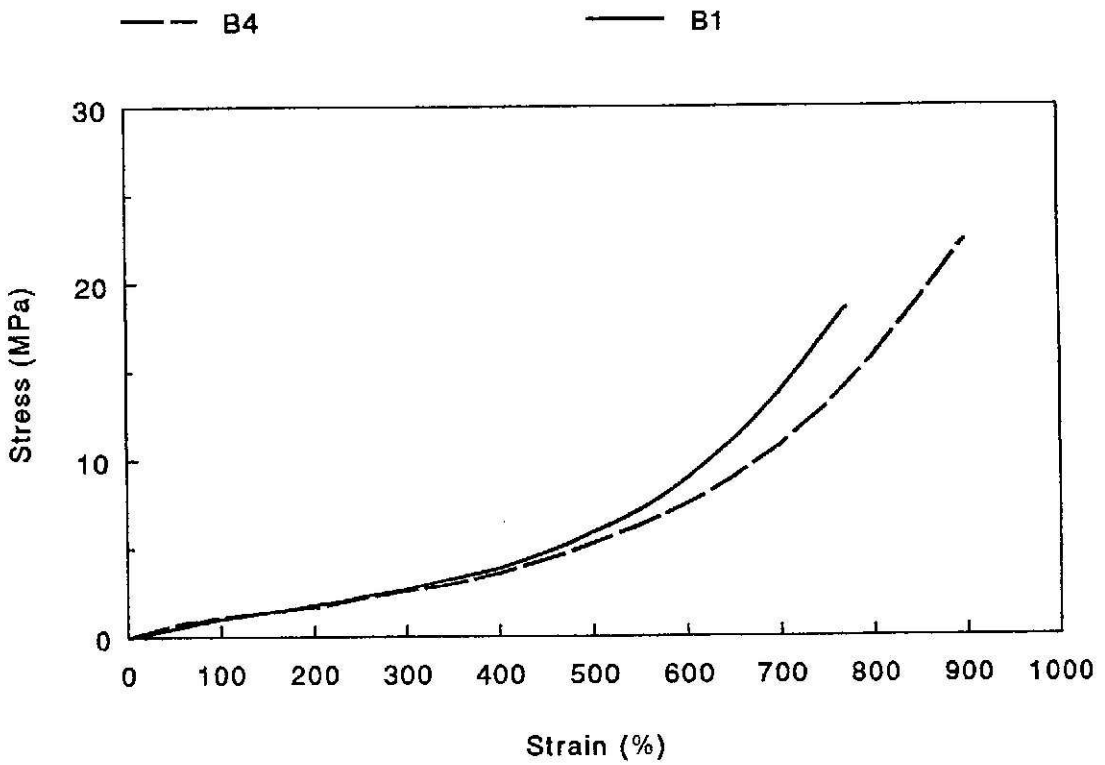
กราฟเปรียบเทียบแสดงความต้าน-ความเครียด(Stress-strain curves)ของNR ULDPE และB4-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาด (Tensile strength) ที่ได้จากการทดลอง (E) และที่ได้จากการคำนวณ (C) ของยางผสม NR/SBR (SBR) และยางผสม NR/ULDPE (PE)

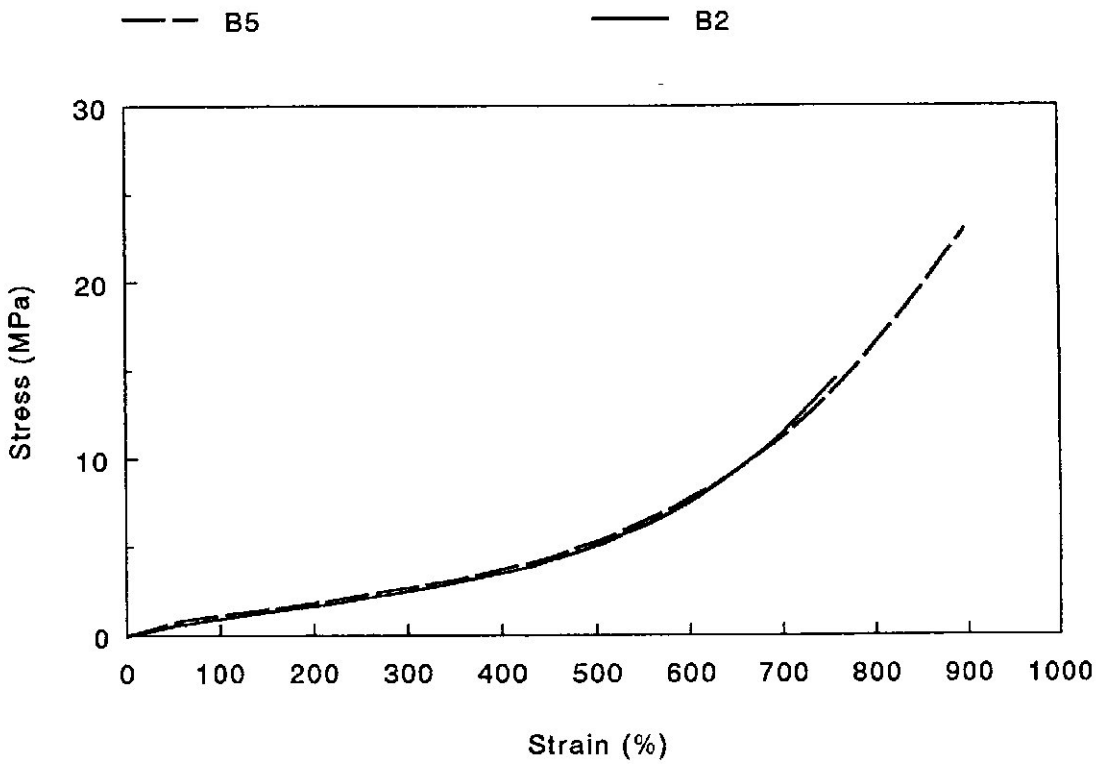


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) ที่ได้จากการทดลอง (E) และที่ได้จากการคำนวณ (C) ของยางผสมNR/SBR (SBR) และยางผสมNR/ULDPE (PE)



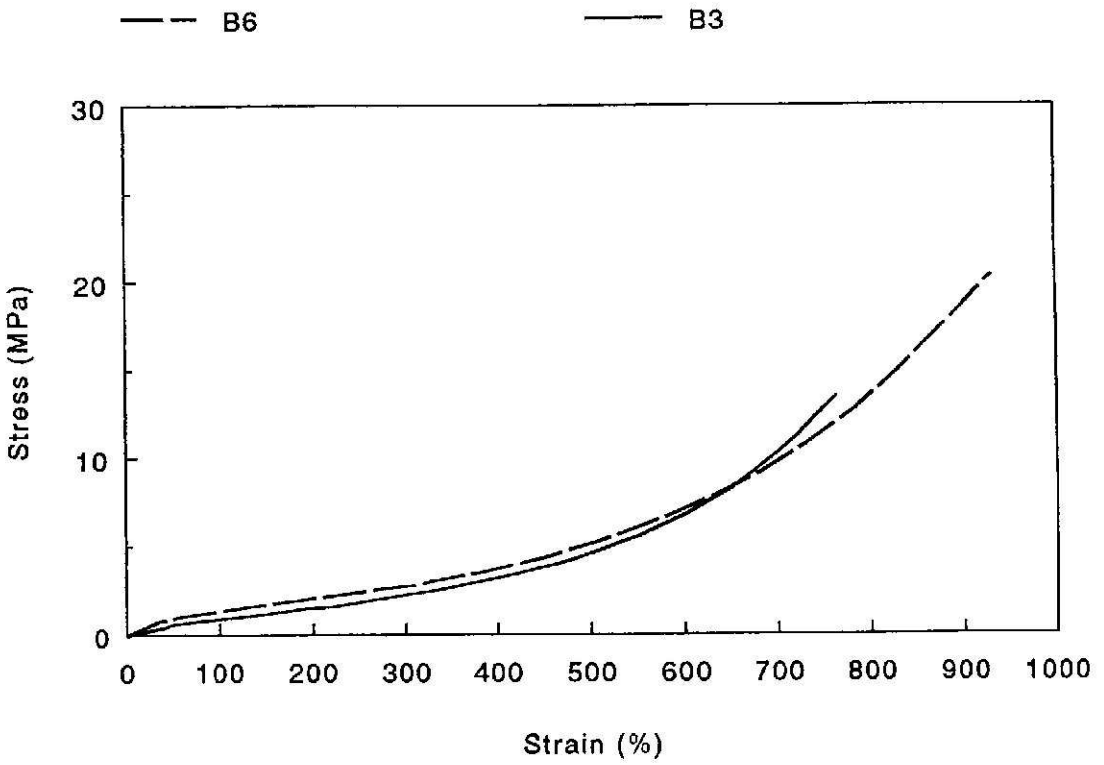
รูปที่ 4.15

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ระหว่าง B1 (30% SBR) และ B4 (30% ULDP) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



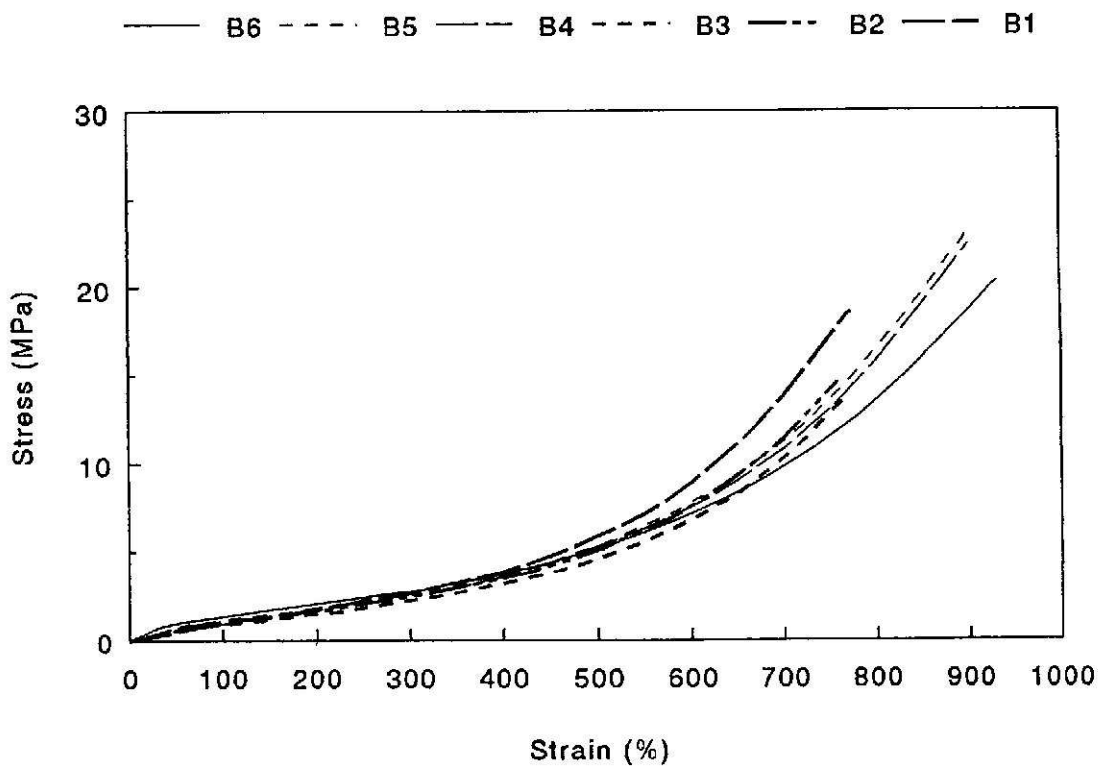
รูปที่ 4.16

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ระหว่าง B2 (40% SBR) และ B5 (40% ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



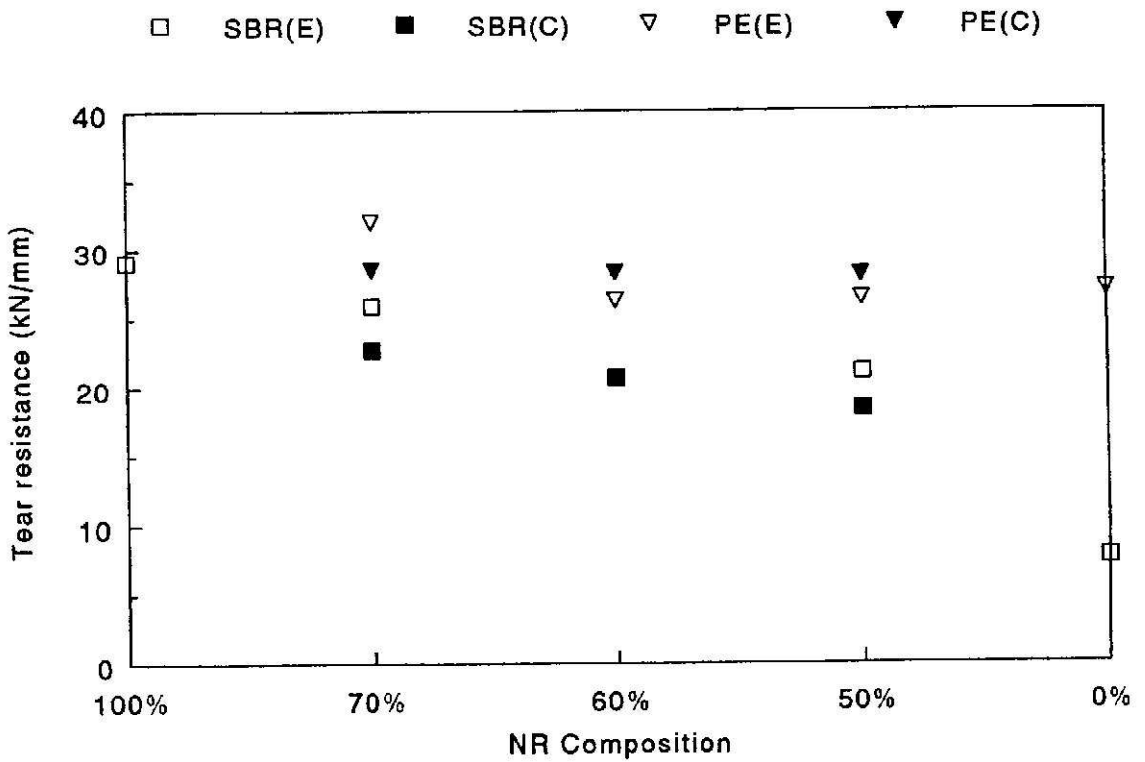
รูปที่ 4.17

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ระหว่าง B3 (50% SBR) และ B6 (50% ULDPE) ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



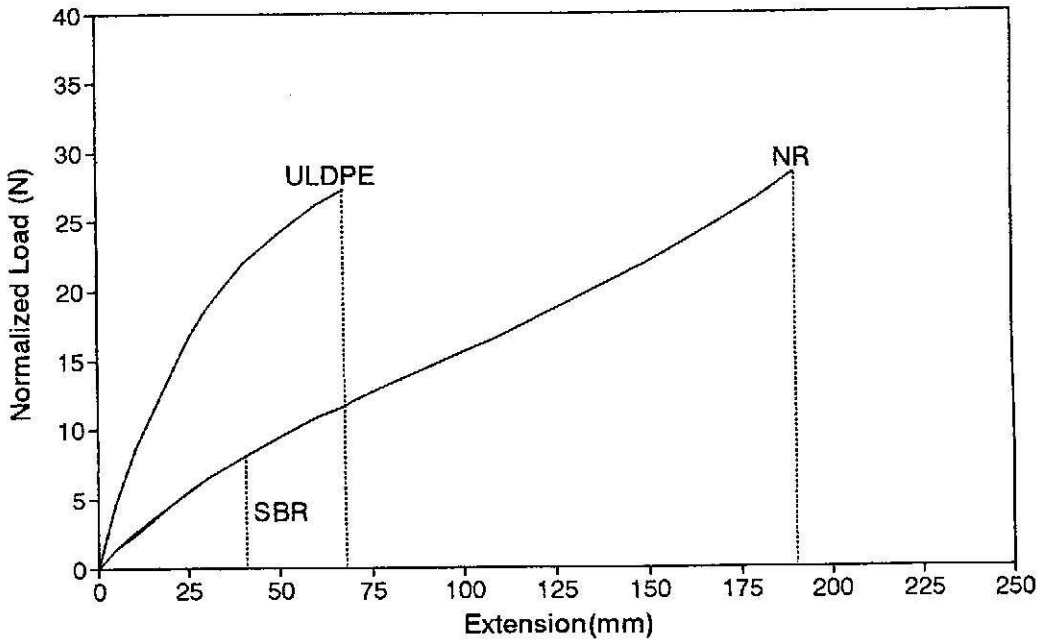
รูปที่ 4.18

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของยางผสม B1-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



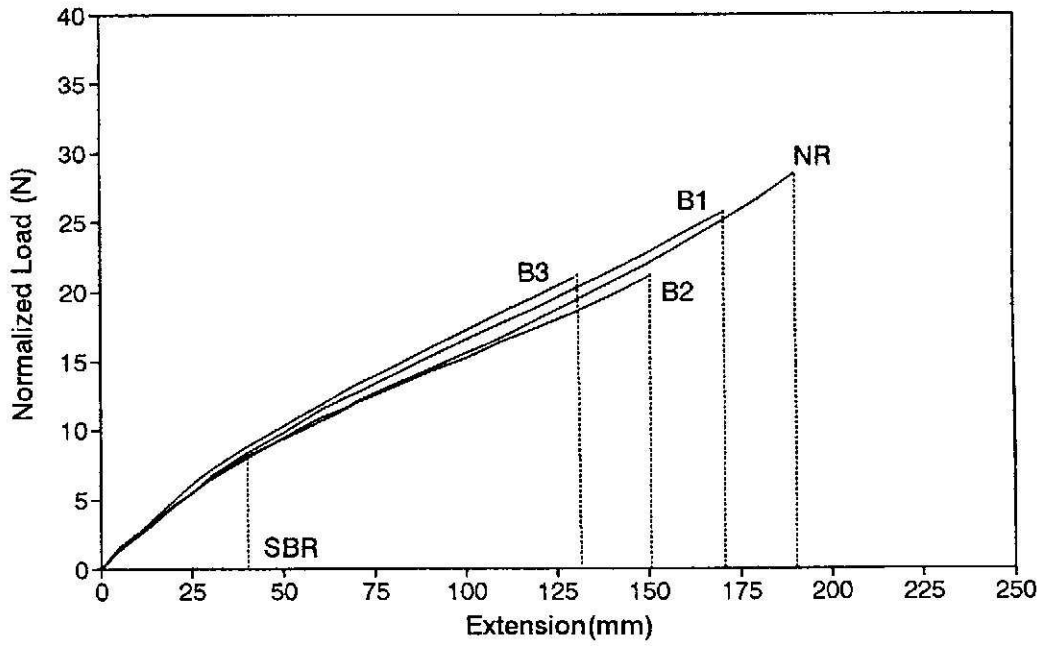
รูปที่ 4.19

กราฟแสดงการเปรียบเทียบความต้านทานการฉีกขาด(Tear resistance) ที่ได้จากการทดลอง (E) และที่ได้จากการอัดนวม (C) ของยางผสมNR/SBR (SBR) และยางผสมNR/ULDPE (PE)



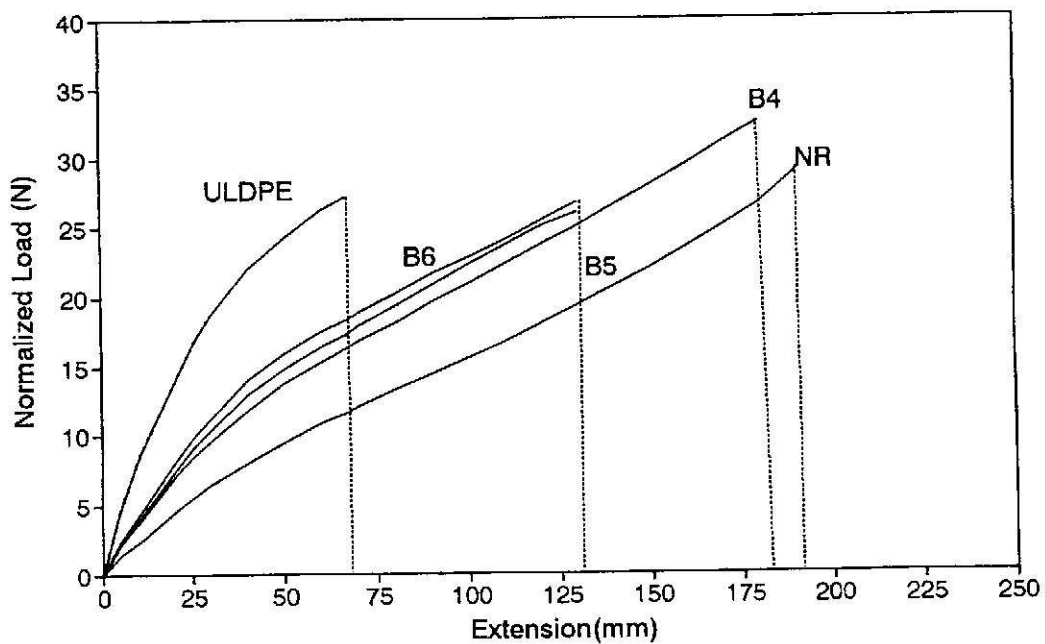
รูปที่ 4.20

กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของ NR SBR และ ULDPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



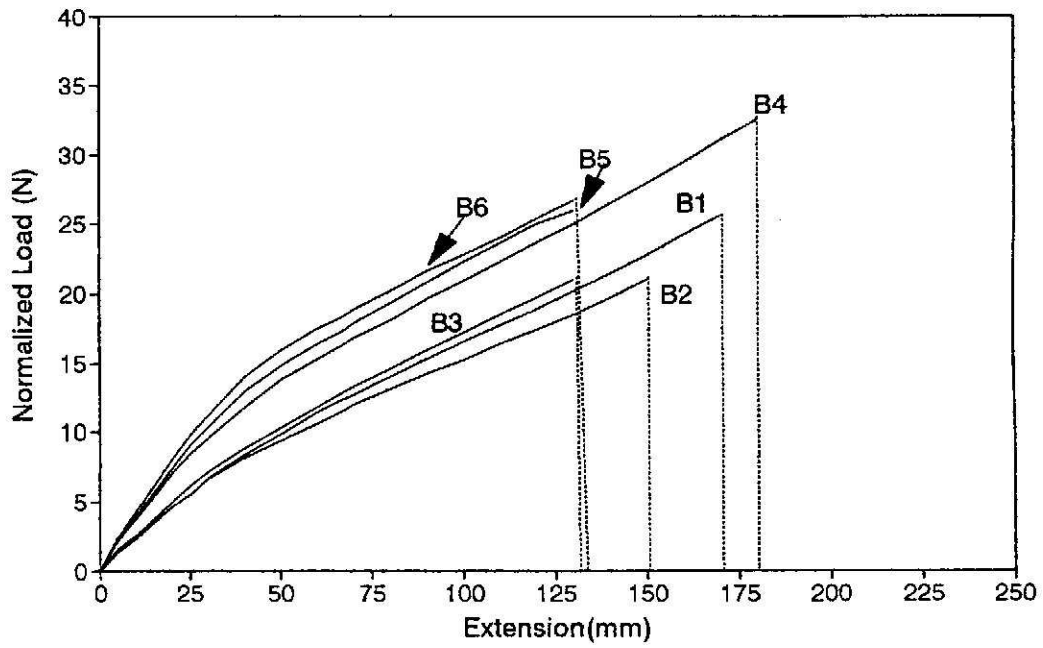
รูปที่ 4.21

กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของ NR SBR และ B1-B3 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



รูปที่ 4.22

กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของ NR ULDPPE และ B4-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบแสดง Load-extension curves จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ของยางผสม B1-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที

5. คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม : การทดลองชุดที่2

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อการขีดถูและความต้านทานต่อการหักงอในบทที่4บ่งชี้ว่า สูตรคอมปาวด์ที่ใช้(สูตรที่2ในตารางที่3.2)ทำให้ยางนิ่มเกินไป ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงสูตร เพื่อจะได้เปรียบเทียบความต้านทานต่อการขีดถูระหว่างยางผสมNR/ULDPEและยางผสมNR/SBR เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้สูตรวัลคาไนซ์แบบธรรมดา(conventional vulcanization) จึงกำหนดการใช้ปริมาณของซัลเฟอร์ไม่เกิน 2.5 phr และเลือกใช้สูตรที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมยาง สูตรปรับปรุงใหม่นี้ทำให้สามารถทดสอบความต้านทานต่อการขีดถูได้ แต่ความแข็งของยางผสมNR/SBRยังต่ำกว่า 50 (shore A) ซึ่งยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ และคณะวิจัยคาดว่าสูตรปรับปรุงใหม่นี้มิได้ช่วยให้ยางผสมNR/ULDPEมีความต้านทานต่อการหักงอสูงกว่าสูตรเดิมที่ใช้ เนื่องจากซัลเฟอร์ทำให้NRแข็งขึ้นเท่านั้น แต่ปัญหาด้านULDPEยังมีได้แก่ไข ฉะนั้น การทดลองชุดที่2นี้จึงมิได้ทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ แต่ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ ได้แก่ คุณสมบัติการดึงยืด ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ความแข็ง และการกระดอน ค่าความหนืดมูนนี้ได้รับการตรวจสอบด้วย

การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของยางและยางผสมที่เตรียมโดยสูตรปรับปรุงนี้ ทำไปเพื่อต้องการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้สูตรเดิม (สูตร2ในตารางที่1) ศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับคุณสมบัติเหล่านี้ เนื่องจากสูตรเดิมให้เนื้อยางนิ่มเกินไปที่จะทดสอบความต้านทานต่อการขีดถูได้

5.1 วัตถุประสงค์

1. ตรวจสอบผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟอร์และCBS ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืด ความต้านทานต่อการขีดถู ความแข็ง และการกระดอน
2. ทดสอบคุณสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนและออกซิเจน
3. ตรวจสอบความหนืดมูนของยางและยางผสม

5.2 วิธีการทดลอง

สูตรที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์ของบทนี้ ให้ชื่อว่าสูตรปรับปรุง ตารางที่5.1แสดงความแตกต่างระหว่างสูตรที่2ที่ใช้ในบทที่4และสูตรปรับปรุงที่ใช้ในบทนี้ ส่วนวิธีการผสม กระบวนการเตรียมชิ้นงานยังคงเหมือนเดิมทุกประการ

5.2.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

ยางและยางผสมที่เตรียมจากสูตรปรับปรุงถูกตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติการดึงยืด ความแข็ง การกระดอน และความต้านทานต่อการขั้ตู่ ในทำนองเดียวกันกับการทดสอบในบทที่4

5.2.2 การทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

การทดสอบนี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D572 เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการดึงยืดของชิ้นงานเมื่อถูกทำให้เสื่อมสภาพ กับคุณสมบัติก่อนการเสื่อมสภาพ การเสื่อมสภาพทำโดยการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 °ซ. มีการหมุนเวียนของอากาศภายในตู้อบตลอดเวลาโดยการถ่ายเทอากาศจากภายนอกเข้าสู่ภายในตู้อบ ทำการอบเป็นระยะเวลา 7 วัน วิธีการนี้จะทำให้ชิ้นงานได้รับออกซิเจนและความร้อนในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งผลการทดลองสามารถใช้เป็นตัวชี้แนะในการเปรียบเทียบความต้านทานต่อโอโซนได้ ชิ้นงานถูกเตรียมเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 (die C) แล้วนำไปอบตามสภาวะดังกล่าว จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติด้านการดึงยืดแล้วเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติการดึงยืดของชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบ ก่อนนำไปทำการเสื่อมสภาพ

การทดสอบแบ่งเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกมีการเติมสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (PAN) และครั้งที่สองไม่มีการเติมสารตัวนี้ สารแอนตี้ออกซิแดนท์จะช่วยให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพ ดังนั้นผลการทดลองอาจไม่เห็นความแตกต่างในกรณีที่มีการเติมสารชนิดนี้

การเปรียบเทียบคุณสมบัติรายงานเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติดังนี้

$$\%P = [(A - B) / B] \times 100$$

$\%P$ = เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ

A = คุณสมบัติหลังผ่านการเสื่อมสภาพ

B = คุณสมบัติก่อนผ่านการเสื่อมสภาพ

ถ้า $\%P$ มีค่าเป็นบวกแสดงว่าคุณสมบัตินั้นเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเสื่อมสภาพ

มีค่าเป็นลบแสดงว่าคุณสมบัตินั้นลดลงเมื่อผ่านการเสื่อมสภาพ

การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบคุณสมบัติการดึงยืด ดำเนินการเช่นเดียวกับที่บรรยายไว้ในบทที่4 รายละเอียดของการทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้อธิบายไว้ในบทที่2 หัวข้อ 2.4 ข้อ 8 และข้อ 9

5.2.2 การทดสอบความหนืดมูหนี

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบไม่มีส่วนผสมของสารเคมี ทำการทดสอบสองครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง การเตรียมชิ้นงานของตัวอย่างแต่ละชนิดทำดังนี้

มดNRให้เป็นเนื้อเดียวกันและทำเป็นแผ่นหนาประมาณ 6 มม. โดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง SBRตัดเป็นแผ่นหนาประมาณ 6 มม. และไม่ผ่านการบด ULDPEเตรียมเป็นแผ่นซีทหนาประมาณ 6 มม. ด้วยเครื่องอัดตามวิธีที่อธิบายในบทที่2 ยางผสม(B1-B6)ผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งตามวิธีที่อธิบายในบทที่2 แต่ควบคุมระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและจำนวนรอบที่บดตัวอย่างเป็นลำดับ ดังนี้

ลำดับ	ขีดสเกลปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง	จำนวนรอบที่บดตัวอย่าง
1. NR	0.15	1
2. SBR หรือ ULDPE	0.15	1
3. ประกมNRจากข้อ1. เข้ากับSBR หรือ ULDPE จากข้อ2. แล้วบดผสมเข้า ด้วยกัน	0.75 0.25 1.00	5 7 3

จากนั้นนำยางผสมนี้ทำเป็นชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความหนืดโดยมีความหนาประมาณ 6 มม. โดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง

5.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง

5.3.1 คุณสมบัติการดึงยืด

กราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของยางและยางผสมที่เตรียมด้วยสูตรปรับปรุงแสดงในรูปที่5.1และรูปที่5.2ตามลำดับ รูปร่างของกราฟเหล่านี้เหมือนกับรูปร่างของกราฟที่แสดงในรูปที่4.10-รูปที่4.12 แสดงว่าการปรับปรุงสูตรคอมปาวด์นี้มิได้มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงที่มากกระทำ(แรงดึง) ผลการทดลองแสดงในตารางที่5.2 รูปที่5.3-รูปที่5.6เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการดึงยืดของยางผสมทั้งสองชนิด และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎี Rule of Mixture ยางผสมทั้งสองทุกอัตราส่วนยังคงแสดงคุณสมบัติสูงกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎี ยางผสมNR/ULDPEยังคงแสดงคุณสมบัติที่เด่นกว่ายางผสมNR/SBR คือ มีค่าโมดูลัสที่300% ความแข็งแรงที่จุดขาด และระยะยืดที่จุดขาดสูงกว่า ถึงแม้ว่าจะมีค่าโมดูลัสที่600%ต่ำกว่าเล็กน้อย ค่าความแข็งแรงของยางผสมทั้งสองชนิดมีค่าลดลงตามปริมาณที่ลดลงของNR อิทธิพลของปริมาณNRที่มีต่อคุณสมบัติการดึงยืดในยางผสมNR/SBRเห็นได้ชัดเจนในยางผสมNR/ULDPEมากกว่าในยางผสมNR/SBR การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการดึงยืดระหว่างสูตรเก่าและสูตรปรับปรุงแสดงในตารางที่5.3 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงที่จุดขาดของยางธรรมชาติไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ค่าโมดูลัสที่300%และที่600% และระยะยืดที่จุดขาดสูงขึ้นในสูตรปรับปรุง ส่วนยางSBRมีค่าโมดูลัสที่300%สูงขึ้นและระยะยืดที่จุดขาดต่ำลงในสูตรปรับปรุง และค่าความแข็งแรงที่จุดขาดลดลงเล็กน้อย ยางผสมNR/SBRมีค่าโมดูลัสที่300%และที่600%สูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรง

แรงที่จุดขาดและระยะยืดที่จุดขาดต่ำลง ยางผสมNR/ULDPEมีค่าโมดูลัสที่300%และที่600%สูงขึ้น ค่าความแข็งแรงที่จุดขาดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และระยะยืดที่จุดขาดต่ำลง ผลของการปรับปรุงสูตรที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลด้านนี้ เป็นไปตามที่คาดไว้ คือความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความยืดหยุ่น (flexibility) ลดลง เนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวม กล่าวได้ว่าค่าของคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ยังอยู่ในช่วงเดียวกันกับค่าเดิม ผลการทดลองสรุปได้ว่า ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเคมีบางชนิดในสูตรผสม ยางและยางผสม ยังคงแสดงพฤติกรรมเหมือนเดิม ยางผสมNR/ULDPEยังคงมีคุณสมบัติการตั้งยึดที่ดีและน่าจะใช้แทนยางผสมNR/SBRในงานด้านนี้ได้

5.3.2 ความแข็งแรงและการกระดอน

ค่าความแข็งแรงและค่าการกระดอนของยางและยางผสมที่เตรียมจากสูตรปรับปรุง แสดงในตารางที่5.4 SBRมีความแข็งแรงมากกว่าNRเล็กน้อย ยางทั้งสองชนิดมีความแข็งแรงต่ำกว่าULDPEมาก ดังนั้นยางผสมNR/ULDPEจึงแข็งแรงกว่ายางผสมNR/SBR และความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของULDPE ส่วนความแข็งแรงของยางผสมNR/SBRทั้งสามอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งแรงที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎี Rule of Mixture ซึ่งบ่งบอกความเข้ากันได้ดีของยางผสมเหล่านี้

NRมีค่าการกระดอนสูงกว่าSBR ค่าการกระดอนของยางผสมNR/SBRสูงกว่ายางผสมNR/ULDPEเล็กน้อย ค่าการกระดอนของยางผสมทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าNR และมีค่าลดลงตามปริมาณที่ลดลงของNR ค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎี Rule of Mixture เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรง

เป็นที่คาดหมายว่าสูตรปรับปรุงน่าจะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์มากขึ้น ดังนั้นค่าความแข็งแรงน่าจะมากขึ้นกว่าสูตรเดิม ผลการเปรียบเทียบระหว่างสูตรเก่าและสูตรใหม่แสดงในตารางที่5.5 จะเห็นว่าความแข็งแรงของสูตรใหม่มีได้มากกว่าสูตรเดิมมากนัก นอกจากนี้ทั้งสองสูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ ยางผสมNR/ULDPEแข็งแรงกว่ายางผสมNR/SBR ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของULDPE ส่วนความแข็งแรงของยางผสมNR/SBRทั้งสามอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าการกระดอนของสูตรใหม่สูงกว่าสูตรเดิมเล็กน้อย

5.3.3 ความต้านทานต่อการขีดข่วน

ถึงแม้ว่าสูตรปรับปรุงจะมีได้เพิ่มความแข็งแรงให้กับยางมากนัก แต่ลักษณะที่สำคัญอันหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการปรับสูตร นั้นคือ ลักษณะเหนียว(tack)ของชิ้นงานจะหายไป ผิวหน้าชิ้นงานมีลักษณะต้านมากขึ้น ในขณะที่สูตรเดิมจะทำให้ชิ้นงานมีผิวหน้าค่อนข้างเหนียวและเป็นเงามัน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ยางจากผิวหน้าของชิ้นงานพันลูกกลิ้ง(หินขัด)ของเครื่องทดสอบ จนไม่สามารถทดสอบได้ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่4

ค่าความต้านทานต่อการขูดฉีกในการทดสอบนี้ พิจารณาจากน้ำหนักของชิ้นงานที่หายไปหลังจากขูดฉีกเป็นจำนวน 3,000 รอบ (รายละเอียดเครื่องมือและการทดสอบดูบทที่2 หัวข้อ2.4 ข้อ7) ถ้าน้ำหนักหายไปมาก แสดงว่ามีความต้านทานต่ำ ผลการทดลองสรุปในตารางที่5.6 NRและยางผสมNR/SBRมีน้ำหนักหายไปน้อยมาก SBRมีน้ำหนักหายไปเล็กน้อย แต่ULDPEมีน้ำหนักหายไปมาก แสดงว่ายางผสมNR/ULDPEมีความต้านทานต่อการขูดฉีกต่ำกว่ายางผสมNR/SBR และความต้านทานลดลงเมื่อมีปริมาณULDPEมากขึ้น

ความต้านทานต่อการขูดฉีกต่ำนี้เป็นข้อด้อยของยางผสมNR/ULDPE สาเหตุอาจเนื่องมาจากULDPEไม่มีการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงต่ำกว่า จึงถูกขูดฉีกออกไปได้ง่ายกว่าNRและSBR การปรับปรุงคุณสมบัติด้านนี้ เป็นสิ่งที่ควรศึกษาต่อ เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งานด้านอุตสาหกรรม การปรับปรุงอาจทำได้โดยการทำให้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล ด้วยการใช้สารเปอร์ออกไซด์ หรือเติมสารเพิ่มความแข็งแรง เช่น ผงดำ

5.3.4 ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึด ดังนั้น ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพจึงยังพิจารณาจากคุณสมบัติด้านนี้อยู่ รูปที่5.1และรูปที่5.2เป็นกราฟของชิ้นงานที่มีการเติมสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (PAN) ทำการทดสอบก่อนการเสื่อมสภาพ รูปร่างของกราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่เติมPANหลังการเสื่อมสภาพ รวมทั้งชิ้นงานที่ไม่เติมPANก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ มีรูปร่างหาคงเดิมเหมือนกันกับรูปที่5.1และรูปที่5.2 เพียงแต่มีค่าคุณสมบัติต่างๆเปลี่ยนไป คุณสมบัติการดึงยึดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพแสดงในตารางที่5.7(มีPAN)และตารางที่5.8(ไม่มีPAN) ถ้ามีเพียงชิ้นงานเดียวในจำนวนชิ้นงานที่ทดสอบทั้งหมดแสดงค่าคุณสมบัติ เช่น E_{300%} หรือ E_{600%} ถือว่าตัวอย่างทดสอบชุดนี้ไม่แสดงคุณสมบัติดังกล่าว

ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยึดเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพ สรุปในตารางที่5.9(มีPAN)และตารางที่5.10(ไม่มีPAN) รูปที่5.7-รูปที่5.10แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยึดต่างๆ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสที่300%ของSBRติดลบ100%(มีPAN) SBRที่ไม่มีPANไม่มีค่านี้เพราะชิ้นงานขาดก่อนที่ระยะยืด300% ส่งผลให้B3(50%SBR)ที่ไม่มีPANติดลบ100%เช่นเดียวกัน ในขณะที่ชิ้นงานอื่นๆมีค่าเป็นบวก ยางผสมNR/ULDPEมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ายางผสมNR/SBR ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีPAN

โมดูลัสที่600%(รูปที่5.8)ของยางผสมNR/SBRเปลี่ยนแปลงไปในด้านลบถึง100%ทุกอัตราส่วน ตรงข้ามกับยางผสมNR/ULDPEที่เปลี่ยนแปลงไปในทางบวก ยางผสมNR/SBRเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่ายางผสมNR/ULDPE การเปลี่ยนแปลงของแรงดึงที่จุดขาด(รูปที่5.9) จะมีค่าติดลบอย่างมากในยางผสมNR/SBR โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงานที่ไม่มีPANจะแสดงการลดลงอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงของระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมNR/SBRก็เห็นได้ชัดเจนมากกว่าในยางผสมNR/ULDPE(รูปที่5.10)

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ยางผสมNR/ULDPEมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสความร้อนและออกซิเจนดีกว่ายางผสมNR/SBR สามารถกล่าวอีกแง่หนึ่งได้ว่า ยางผสมNR/ULDPEมีความต้านทานต่อโอโซนดีกว่ายางผสมNR/SBR

5.3.5 ค่าความหนืดมูนนี้

ค่าความหนืดมูนนี้สรุปในตารางที่5.11 NRมีความหนืดสูงกว่าSBRและULDPEในขณะที่ SBRและULDPEมีความหนืดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำไปผสมกับNRแล้วปรากฏว่า ยางผสมNR/ULDPEมีความหนืดต่ำกว่ายางผสมNR/SBR ความหนืดของยางผสมNR/SBRลดลงเมื่อมีปริมาณSBRมากขึ้น แต่ความหนืดของยางผสมNR/ULDPEไม่ขึ้นกับปริมาณของส่วนผสม ความหนืดที่วัดได้ของยางทั้งสองชนิดนี้ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี Rule of Mixture การลดลงของความหนืดอาจพิจารณาได้หลายกรณี อาจเกิดการแตกหักของสายโซ่โมเลกุลระหว่างการเตรียมยางผสม SBRและULDPEอาจทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นเนื่องจากเข้ากันได้ดีกับNR เมื่อโมเลกุลของSBRและULDPEเกิดการลื่นไถล จะเกี่ยวพันให้โมเลกุลของNRลื่นไถลตามไปด้วย หรืออาจเกิดขึ้นทั้งสองกรณี

ความสำคัญของความหนืดคือ การแสดงให้เห็นถึงความยากง่ายในการแปรรูป และบ่งชี้ถึงคุณลักษณะของโมเลกุล เช่น น้ำหนักโมเลกุล การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล และรูปร่างของโมเลกุล เนื่องจากยังไม่มีมีการตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของชิ้นงาน จึงไม่สามารถหาข้อสรุปได้อย่างชัดเจน ในกรณีที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน ค่าความหนืดที่ต่ำกว่าจะช่วยให้การแปรรูปง่ายขึ้น ค่าความหนืดของยางผสมสองชนิดในทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นถ้าสมมติว่าน้ำหนักโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ถ้านำยางผสมNR/ULDPEมาใช้แทนยางผสมNR/SBR กระบวนการแปรรูปน่าจะทำได้ง่ายเมื่อใช้สภาวะเช่นเดียวกับที่ใช้กับยางผสมNR/SBR นี่เป็นข้อดีอีกอันหนึ่งของยางผสมชนิดใหม่ ที่สามารถนำไปแทนที่ยางผสมNR/SBRได้

5.4 สรุปผลการทดลอง

1. สูตรปรับปรุงให้ผลการทดลองทำนองเดียวกันกับสูตรที่2ในบทที่3 ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ
2. ยางผสมNR/ULDPEแสดงคุณสมบัติการดึงยึดดีกว่ายางผสมNR/SBR และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับNR ยางผสมNR/ULDPEทั้งสามอัตราส่วนแสดงคุณสมบัติใกล้เคียงกัน
3. ความแข็งและการกระดอนของสูตรปรับปรุงใหม่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าใหม่นี้สูงกว่าค่าที่ได้จากสูตรเก่า(สูตรที่2)เล็กน้อย
4. ความต้านทานต่อการขีดข่วนของยางผสมNR/ULDPEดีกว่ายางผสมNR/SBRอย่างเห็นได้ชัด

5. ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนและออกซิเจนของยางผสมNR/ULDPEดีกว่ายางผสมNR/SBR
6. มีความเป็นไปได้ที่จะนำยางผสมNR/ULDPEใช้แทนที่ยางผสมNR/SBR หรือนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมในอนาคต โดยต้องมีการทำวิจัยต่อไปในระดับลุ่มลึก

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสูตรคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 1 ในบทที่ 4 และสูตรคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลองชุดปัจจุบัน (สูตรปรับปรุง)

สารเคมี	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (phr)	
	สูตรเก่า (สูตรที่ 2)	สูตรปรับปรุง
ZnO	5.0	5.0
Stearic acid	2.0	2.0
PAN	1.0	1.0
CBS	0.8	1.2
sulfer	2.0	2.5

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติการดึงยืด (Tensile properties) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) (ยางคอมพาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)

Sample	$E_{300\%}$ (MPa)	$E_{600\%}$ (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
NR	2.85 ± 0.05	11.70 ± 0.56	21.87 ± 3.32	725 ± 31
SBR	2.25 ± 0.18	-	2.38 ± 0.25	306 ± 47
B1	2.66 ± 0.03	9.92 ± 0.57	16.53 ± 2.49	702 ± 33
B2	2.92 ± 0.05	11.29 ± 0.27	13.53 ± 5.28	617 ± 90
B3	2.88 ± 0.05	11.38 ± 0.67	10.16 ± 3.81	562 ± 83
B4	3.12 ± 0.04	9.99 ± 0.43	24.51 ± 1.02	842 ± 12
B5	3.25 ± 0.09	9.62 ± 0.44	22.26 ± 0.99	813 ± 52
B6	3.35 ± 0.06	9.34 ± 0.89	20.88 ± 3.62	859 ± 21

หมายเหตุ ใช้ L_0 เท่ากับ 65 มม.

$E_{300\%}$ คือค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300%

$E_{600\%}$ คือค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 600%

σ_b คือความแข็งแรงที่จุดขาด

ϵ_b คือระยะยืดที่จุดขาด

* standard deviation

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการดึงยืด(Tensile properties)ระหว่างสูตรเก่า(สูตรที่ 2, Old)และสูตรปรับปรุง(New) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)

Sample	E _{300%} (MPa)		E _{600%} (MPa)		σ _b (MPa)		ε _b (%)	
	Old	New	Old	New	Old	New	Old	New
NR	2.06	2.85	7.45	11.70	21.00	21.87	889	725
SBR	1.30	2.25	1.88	-	2.47	2.38	510	306
B1	2.58	2.66	8.31	9.92	18.91	16.53	795	702
B2	2.43	2.92	7.47	11.29	14.58	13.53	750	617
B3	2.31	2.88	6.92	11.38	13.62	10.16	740	562
B4	2.49	3.12	7.23	9.99	22.72	24.51	972	842
B5	2.62	3.25	7.22	9.62	23.12	22.26	933	813
B6	2.82	3.35	7.24	9.34	20.45	20.88	920	859

E_{300%} คือค่าโมดูลัสที่ระยะยืด300%

E_{600%} คือค่าโมดูลัสที่ระยะยืด600%

σ_b คือความแข็งแรงที่จุดขาด

ε_b คือระยะยืดที่จุดขาด

ตารางที่ 5.4 ค่าความแข็ง(Hardness)และค่าการกระดอน(Resilience)ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) ที่เตรียมจากสูตรปรับปรุง

Sample	Hardness (Shore A)		Resilience (%)	
	Experiment	Calculation	Experiment	Calculation
NR	44.42 ± 0.54	-	72.82 ± 0.24	-
SBR	47.46 ± 0.25	-	59.40 ± 0.38	-
B1	45.98 ± 0.35	45	69.50 ± 0.31	71
B2	46.56 ± 0.31	45	67.98 ± 0.30	67
B3	46.78 ± 0.19	46	66.66 ± 0.27	66
B4	51.70 ± 0.33	53	67.76 ± 0.21	-
B5	53.56 ± 0.50	56	66.10 ± 0.20	-
B6	56.58 ± 0.19	60	64.72 ± 0.41	-

หมายเหตุ ค่าความแข็งของULDPEเท่ากับ 75(จากตารางที่1.1)

ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็ง(Hardness)และการกระดอน(Resilience)ระหว่างสูตรเก่า(สูตรที่2, Old)และสูตรปรับปรุง(New) ของNR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)

Sample	Hardness (Shore A)		Resilience (%)	
	Old	New	Old	New
NR	39	44	66	73
B1	42	46	65	70
B2	42	47	64	68
B3	43	47	64	67
B4	49	52	64	68
B5	52	54	62	66
B6	56	57	61	65

ตารางที่ 5.6 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู(Abrasion resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)

Sample	Weight loss (gm) per 3,000 cycles
NR	0.0250
SBR	0.1213
B1	0.0239
B2	0.0251
B3	0.0254
B4	1.3365
B5	1.8342
B6	1.9432

ตารางที่ 5.7 คุณสมบัติการดึงยึดของก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR(B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)

Sample	E _{300%} (MPa)		E _{600%} (MPa)		σ _b (MPa)		ε _b (%)	
	Unaged	Aged	Unaged	Aged	Unaged	Aged	Unaged	Aged
NR	2.85 ± 0.05	3.28 ± 0.13	11.70 ± 0.56	15.18 ± 1.40	21.87 ± 3.32	23.15 ± 1.17	724 ± 31	691 ± 21
SBR	2.25 ± 0.18①	x	x	x	2.38 ± 0.25	2.64 ± 0.47	306 ± 47	224 ± 39
B1	2.66 ± 0.03	3.77 ± 0.09	9.92 ± 0.57	0 ②	16.53 ± 2.49	13.93 ± 4.24	702 ± 33	534 ± 66
B2	2.92 ± 0.05	3.64 ± 0.08	11.29 ± 0.27③	0 ④	13.53 ± 5.28	12.31 ± 4.03	617 ± 90	523 ± 58
B3	2.88 ± 0.05	3.90 ± 0.12	11.38 ± 0.67⑤	x	10.16 ± 3.81	7.45 ± 3.42	562 ± 84	405 ± 90
B4	3.12 ± 0.04	3.51 ± 0.06	9.99 ± 0.43	12.58 ± 0.58	24.81 ± 1.02	20.25 ± 1.64	842 ± 12	718 ± 26
B5	3.25 ± 0.09	3.62 ± 0.06	9.62 ± 0.44	12.43 ± 0.55	20.88 ± 3.62	20.50 ± 0.71	813 ± 52	742 ± 10
B6	3.35 ± 0.06	3.58 ± 0.04	9.34 ± 0.89	11.02 ± 0.06	22.26 ± 0.89	19.20 ± 1.01	859 ± 21	770 ± 34

x ชั้นตัวอย่างขาดก่อนถึงตำแหน่งนี้

- ① จากชั้นทดสอบทั้งหมด 7 ชั้น มีเพียง 4 ชั้นที่แสดงค่านี้
- ② จากชั้นทดสอบทั้งหมด 6 ชั้น มีเพียง 1 ชั้นที่แสดงค่านี้
- ③ จากชั้นทดสอบทั้งหมด 8 ชั้น มีเพียง 5 ชั้นที่แสดงค่านี้
- ④ จากชั้นทดสอบทั้งหมด 8 ชั้น มีเพียง 1 ชั้นที่แสดงค่านี้
- ⑤ จากชั้นทดสอบทั้งหมด 7 ชั้น มีเพียง 3 ชั้นที่แสดงค่านี้

ตารางที่ 5.8 คุณสมบัติการดึงยืดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพ(Aging resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียม โดยใช้สูตรปรับปรุง แต่ไม่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนท์)

Sample	E _{300%} (MPa)		E _{600%} (MPa)		σ _b (MPa)		ε _b (%)	
	Unaged	Aged	Unaged	Aged	Unaged	Aged	Unaged	Aged
NR	2.80 ± 0.06	3.28 ± 0.04	11.30 ± 0.50	14.73 ± 0.46	23.00 ± 1.80	21.76 ± 0.88	748 ± 13	681 ± 10
SBR	0 ①	x	x	x	2.49 ± 0.27	2.31 ± 0.06	275 ± 32	195 ± 3
B1	3.05 ± 0.07	3.65 ± 0.09	12.27 ± 0.29	0 ①	20.27 ± 1.57	11.70 ± 7.49	696 ± 18	488 ± 143
B2	3.09 ± 0.05	3.86 ± 0.05	12.58 ± 0.17	x	16.93 ± 1.84	8.13 ± 4.20	656 ± 20	427 ± 98
B3	3.24 ± 0.07	0 ①	x	x	7.10 ± 1.88	3.84 ± 1.87	474 ± 67	277 ± 100
B4	3.05 ± 0.03	3.36 ± 0.04	9.64 ± 0.24	11.59 ± 0.63	21.95 ± 1.37	19.00 ± 1.35	815 ± 20	721 ± 18
B5	3.13 ± 0.02	3.58 ± 0.07	9.53 ± 0.48	11.35 ± 0.48	22.40 ± 0.39	20.87 ± 0.68	841 ± 18	769 ± 10
B6	3.02 ± 0.03	3.59 ± 0.05	8.59 ± 0.27	10.51 ± 0.38	19.38 ± 0.83	20.81 ± 1.88	854 ± 12	804 ± 37

x ชั้นตัวอย่างขาดก่อนถึงตำแหน่งนี้

① จากชั้นทดสอบทั้งหมด 4 ชั้น มีเพียง 1 ชั้นที่แสดงค่านี้

ตารางที่ 5.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดึงยึดหลังการเสื่อมสภาพ(Aging resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง)

Sample	% Change in Properties after aging			
	$E_{300\%}$	$E_{600\%}$	σ_b	ϵ_b
NR	15.09	29.74	5.85	-4.69
SBR	-100	-	10.92	-26.85
B1	41.73	-100	-15.73	-23.95
B2	24.66	-100	-9.02	-15.23
B3	35.42	-100	-26.67	-28.00
B4	12.50	25.93	-18.38	-14.76
B5	11.38	29.21	-1.82	-8.69
B6	6.87	17.99	-13.75	-10.38

$E_{300\%}$ คือค่าโมดูลัสที่ระยะยืด300%

$E_{600\%}$ คือค่าโมดูลัสที่ระยะยืด600%

σ_b คือความแข็งแรงที่จุดขาด

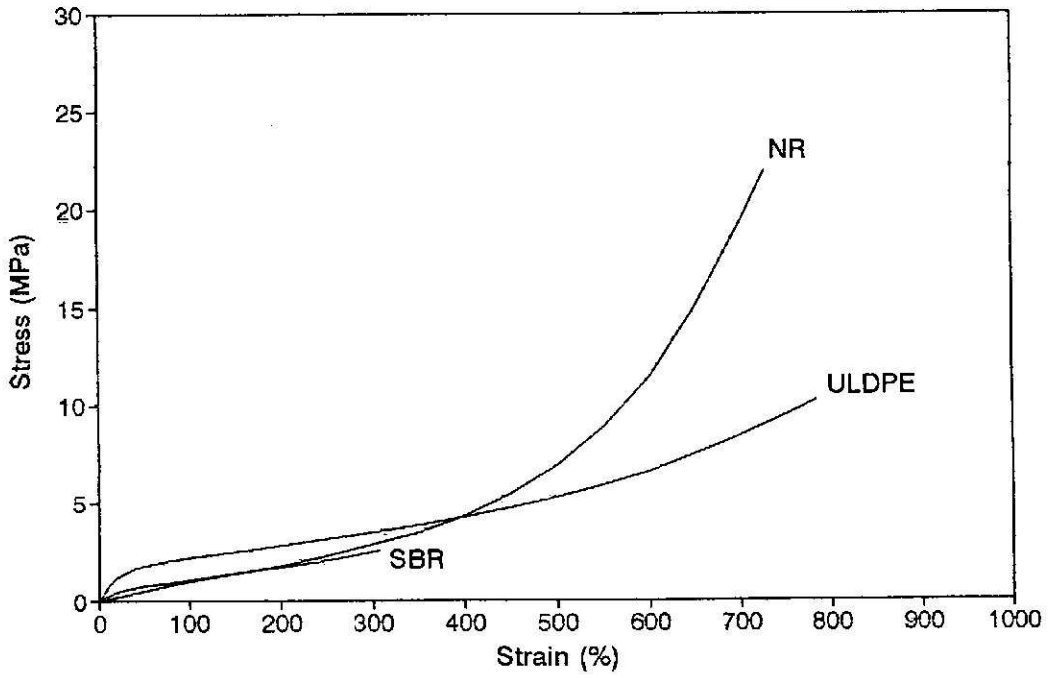
ϵ_b คือระยะยืดที่จุดขาด

ตารางที่ 5.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการดึงยึดหลังการเสื่อมสภาพ(Aging resistance) ของNR SBR ยางผสมNR/SBR(B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) (ยางคอมปาวด์เตรียมโดยใช้สูตรปรับปรุง แต่ไม่ใส่สารแอนตี้ออกซิแดนท์)

Sample	% Change in Properties after aging			
	$E_{300\%}$	$E_{600\%}$	σ_b	ϵ_b
NR	17.14	30.35	-5.39	-8.90
SBR	-	-	-7.23	-28.96
B1	19.67	-100	-42.28	-29.79
B2	24.92	-100	-51.98	-34.95
B3	-100	-	-45.92	-41.59
B4	10.16	20.23	-13.44	-11.46
B5	14.38	19.10	-6.83	-8.64
B6	18.87	22.35	7.38	-5.92

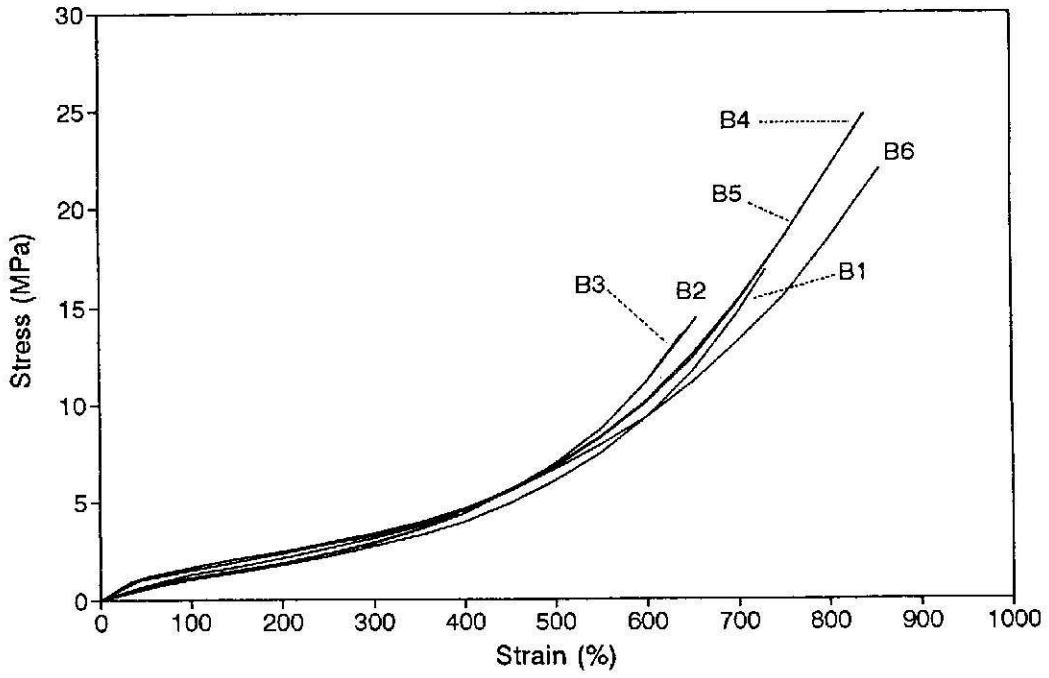
ตารางที่ 5.11 ค่าความหนืดมูนีของ NR SBR ULDPPE ยางผสม NR/SBR(B1-B3) และยางผสม NR/ULDPPE(B4-B6) (ไม่มีสารเคมีเป็นส่วนผสม)

Sample	Mooney Viscosity (ML(1+4)at 100 °C)			
	Experiment			Calculation
	Test #1	Test #2	Average	
NR	71.7	72.2	72	-
SBR	49.5	49.0	49	-
ULDPPE	49.8	49.2	50	-
B1	56.6	55.5	56	65
B2	54.1	54.6	54	63
B3	53.0	53.7	53	61
B4	51.2	50.9	51	65
B5	50.6	51.2	51	63
B6	51.0	51.1	51	61



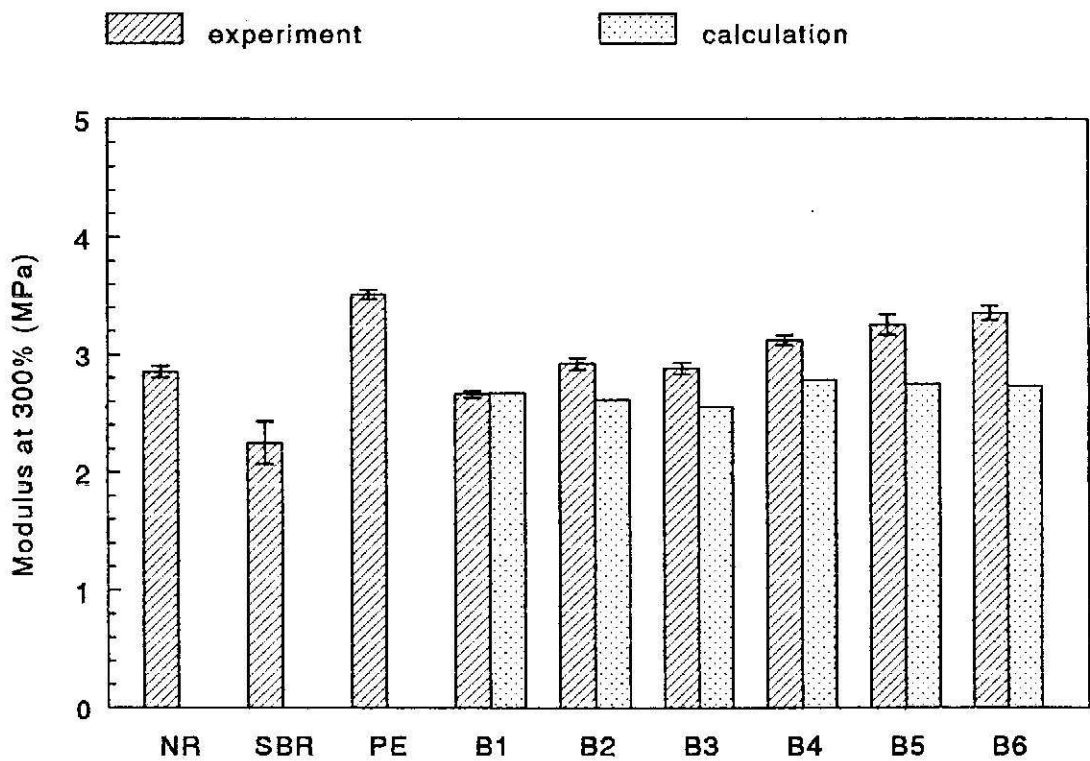
รูปที่ 5.1

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของ NR SBR และ ULDPPE ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



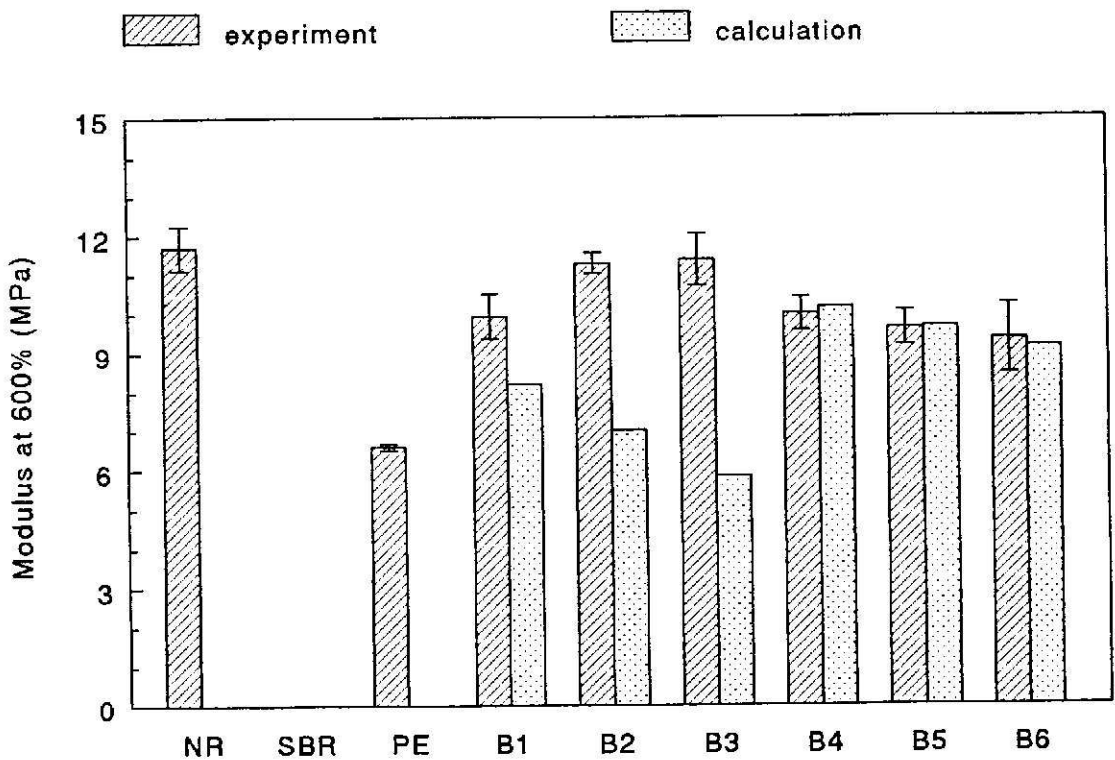
รูปที่ 5.2

กราฟเปรียบเทียบแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curves) ของยางผสม B1-B6 ทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มม./นาที



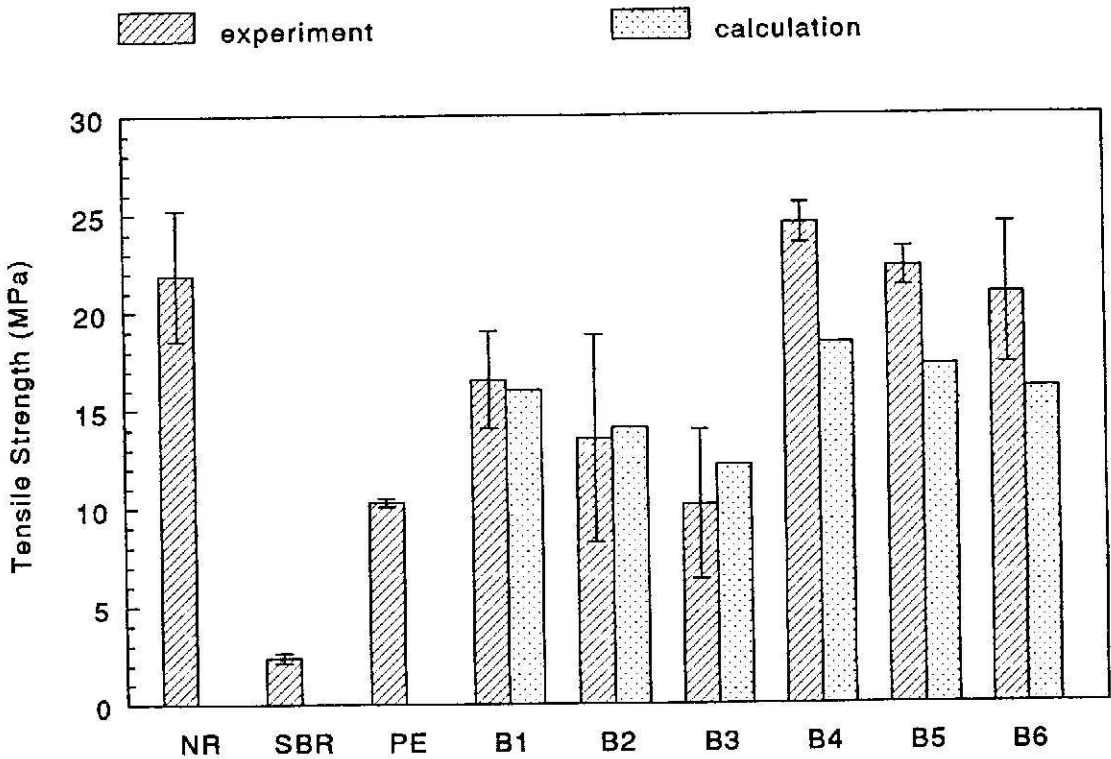
รูปที่ 5.3

กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสที่ 300% (Modulus at 300%) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของ NR SBR ULDPPE ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPPE (B4-B6)



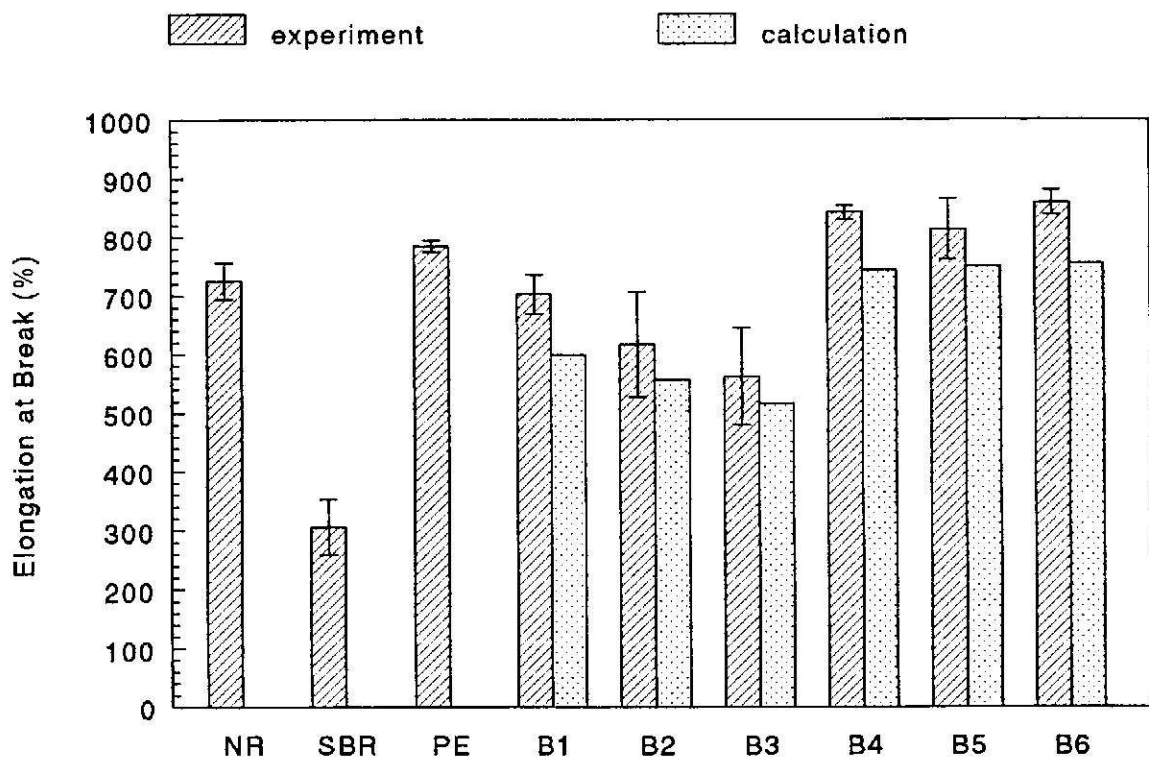
รูปที่ 5.4

กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสที่ 600% (Modulus at 600%) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของ NR SBR ULDP E อย่างผสม NR/SBR (B1-B3) และอย่างผสม NR/ULDP E (B4-B6)



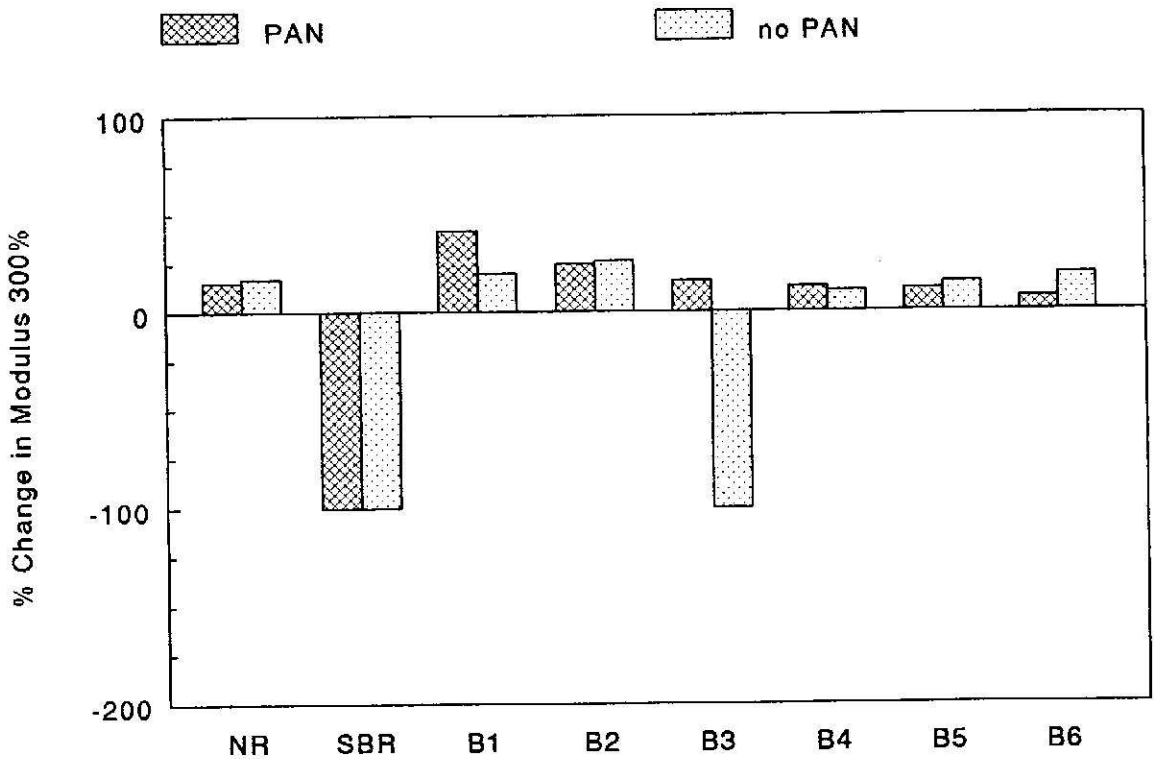
รูปที่ 5.5

กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาด(Tensile strength) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของNR SBR ULDPPE ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6)



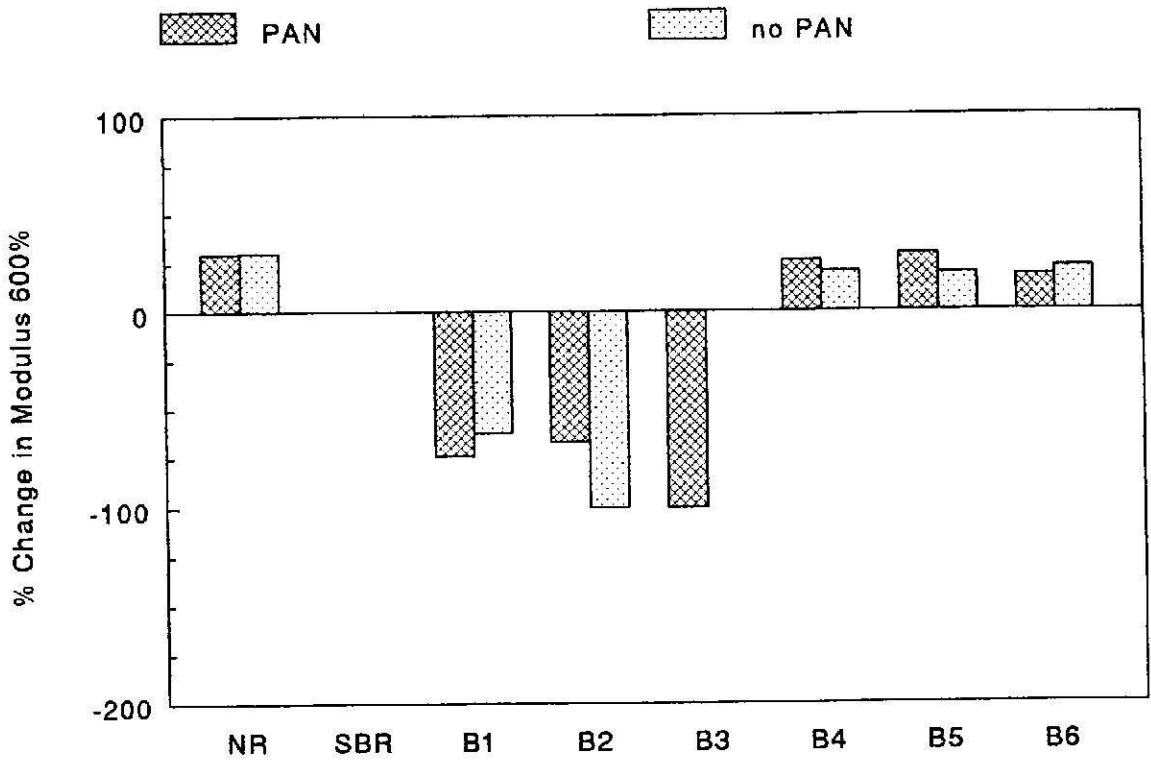
รูปที่ 5.6

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) ที่ได้จากการทดลอง (experiment) และที่ได้จากการคำนวณ (calculation) ของ NR SBR ULDP E ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDP E (B4-B6)

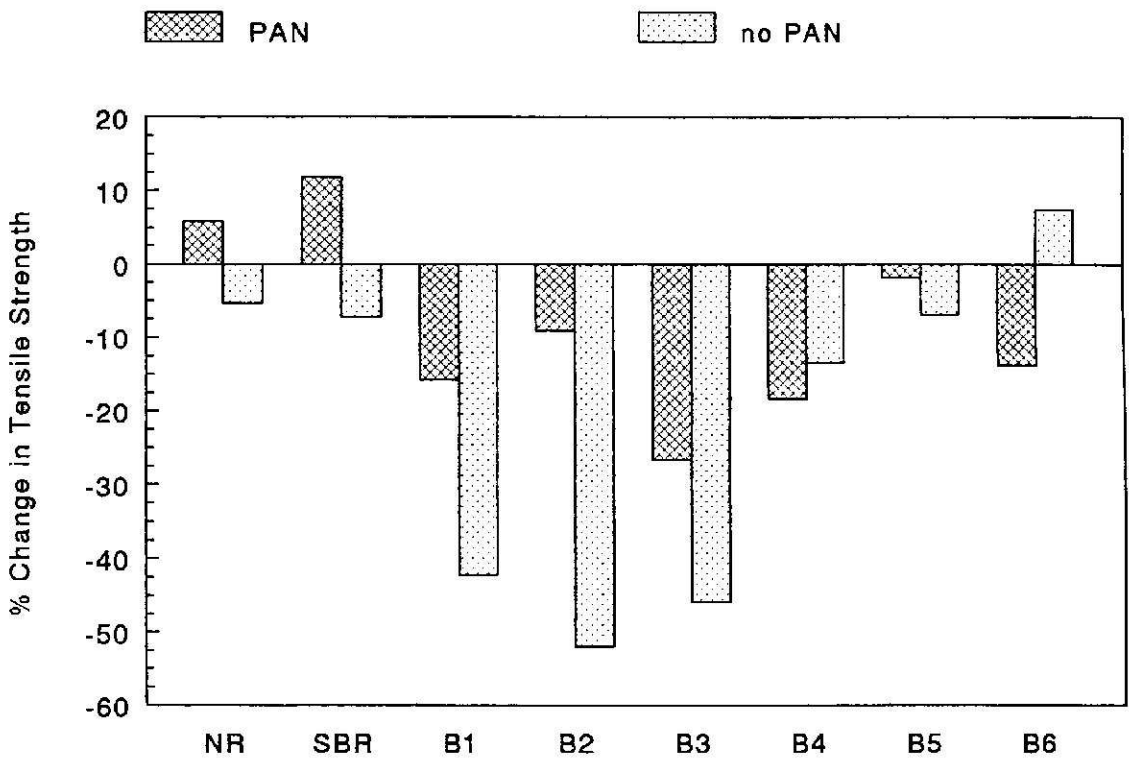


รูปที่ 5.7

กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่300%(Modulus at 300%) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของNR SBR ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนซ์(PAN)และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนซ์(no PAN)

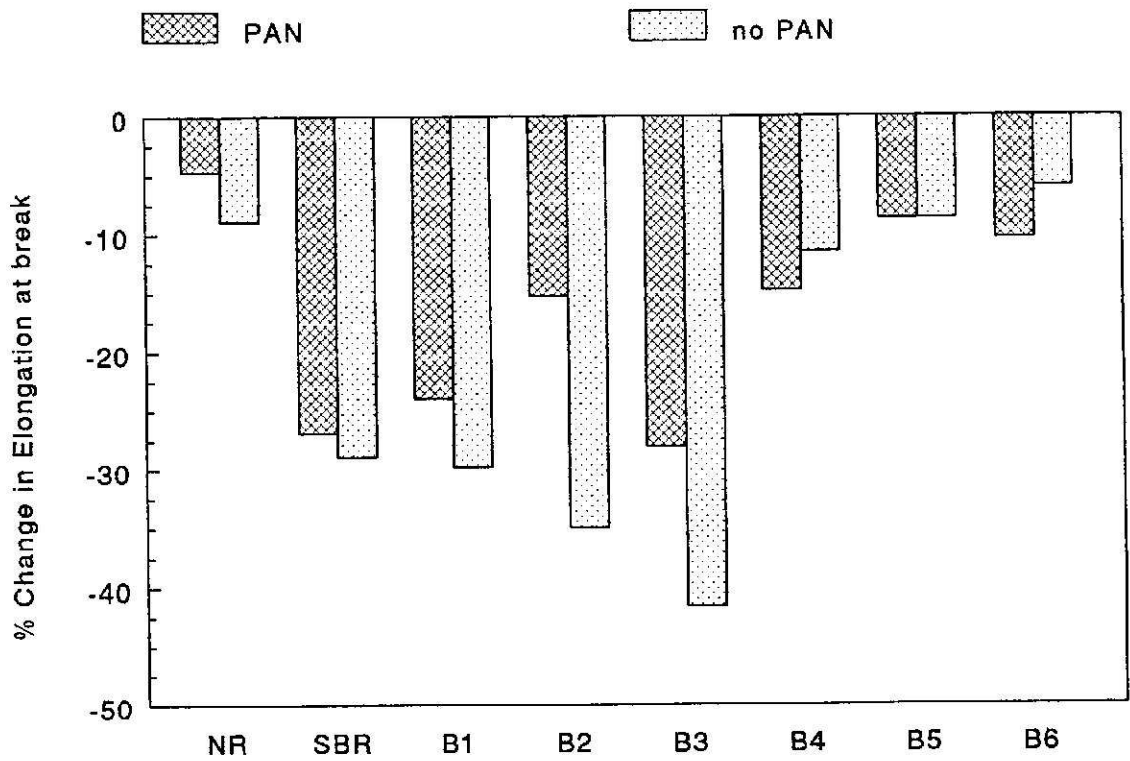


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่ 600% (Modulus at 600%) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (no PAN)



รูปที่ 5.9

กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงที่จุดขาด(Tensile strength) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของNR SBR ยางผสมNR/SBR (B1-B3) และยางผสมNR/ULDPE(B4-B6) ที่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(PAN) และไม่มีสารแอนตี้ออกซิแดนท์(no PAN)



รูปที่ 5.10

กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพของ NR SBR ยางผสม NR/SBR (B1-B3) และยางผสม NR/ULDPE (B4-B6) ที่มีสารแอนติออกซิแดนท์ (PAN) และไม่มีสารแอนติออกซิแดนท์ (no PAN)

6. มอร์โฟโลยี (Morphology) ของยางผสม

6.1 วัตถุประสงค์

เพื่อตรวจสอบมอร์โฟโลยีของยางผสมNR/ULDPE และความเป็นผลึกของULDPEในยางผสมชนิดใหม่นี้

6.2 วิธีการทดลอง

6.2.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1. ชิ้นตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ NR SBR ยางผสมทั้งสองชนิดทุกอัตราส่วน
2. นำชิ้นตัวอย่างที่ขาดแล้วจากการทดสอบคุณสมบัติการดึงยึดในบอทที่3 แคร่ในพาราไซลีนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-5 วัน
3. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการ นำชิ้นงานออกจากตัวทำละลายนี้ ซับด้วยกระดาษกรองที่ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน
4. นำชิ้นงานอบด้วยเครื่องอบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน
5. นำชิ้นงานติดบนแท่งวางตัวอย่าง ชิ้นงานที่จะส่องดูถูกฉาบทองหนาประมาณ 270 Å เพื่อให้นำไฟฟ้า ผิวหน้าของชิ้นงานที่จะดูคือส่วนที่เกิดจากการขาด (fracture surface) ชิ้นงานที่ไม่ถูกแช่ด้วยสารละลาย ถูกนำมาเปรียบเทียบด้วย

6.2.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบดีเอสซี(DSC)

1. ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ ULDPE ทั้งชนิดที่เป็นเม็ดจากโรงงาน และชนิดแผ่นที่ถูกอัดเป็นแผ่นซีทตามที่บรรยายในบอทที่2และบอทที่3 ยางผสมNR/ULDPEทั้งสามอัตราส่วน
2. ตัดตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5 - 8 มิลลิกรัม ทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ -10°C ถึง 100°C ด้วยอัตราการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ 10°C./นาที

6.3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์ผลการทดลอง

6.3.1 มอร์โฟโลยี

NR SBR และยางผสมNR/SBR ไม่แสดงความแตกต่างของพื้นผิวระหว่างก่อนแช่ด้วยพาราไซลีนและหลังแช่ด้วยตัวทำละลายชนิดนี้ ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาแช่นานถึง5วันก็ตาม คือ พื้นผิวจะค่อนข้างเรียบราวกับว่าไม่ถูกละลายด้วยไซลีน ซึ่งเป็นไปตามความคาดหมายเนื่องจากทั้งNRและSBRถูกวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์แล้ว จึงมีลักษณะเป็นโครงสร้างเชื่อมโยงสามมิติ ดังนั้นตัวทำละลาย เช่น ไซลีน ไม่น่าจะมีความสามารถในการละลายยางที่วัลคาไนซ์แล้ว ไซลีนจะทำให้ยางบวมเท่านั้น ชิ้นงานของตัวอย่างทุกชนิดที่ไม่ได้แช่ไซลีนจะมีผิวเรียบมาก และยางผสมจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งชิ้นงาน มองไม่เห็นความแตกต่างของส่วนผสม รูปที่6.1แสดงภาพถ่ายจากเครื่องSEMของNR SBR

และยางผสมNR/SBR (B3) หลังจากแช่ในไซลีนเป็นเวลา 3 วัน สังเกตเห็นว่าSBRมีผิวหยาบกว่าNR แสดงว่าNRทนต่อไซลีนได้ดีกว่าSBR ที่เป็นเช่นนี้ก็ไม่น่าประหลาดใจ เพราะSBRมีโพลิสไตรีนเป็นองค์ประกอบ และการเกิดวัฏคาโนซีในSBR ก็เกิดเฉพาะในโพลีบิวตาไดอีนเท่านั้น ดังนั้น การที่SBRแสดงผิวขรุขระมากขึ้นหลังจากการแช่ในไซลีน อาจเกิดจากการที่โพลิสไตรีนถูกละลายออกไป พื้นผิวของยางผสมNR/SBR (B3) ยังคงค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับNR การแช่ไซลีนเป็นระยะ 1-5 วัน ไม่มีผลต่อพื้นผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบในทุกตัวอย่าง

ยางผสมNR/ULDPEแสดงลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันในทุกอัตราส่วน(จากการสังเกตด้วยตาเปล่า) ชิ้นงานก่อนแช่ไซลีนจะมีลักษณะเรียบ มองไม่เห็นความแตกต่างระหว่างNRและULDPEดังแสดงในรูปที่6.2a ชิ้นงานที่แช่ในไซลีนจะแสดงแต่โครงสร้างหรือส่วนที่เป็นNRเท่านั้น เนื่องจากULDPEละลายในไซลีน รูปที่6.2bเป็นภาพถ่ายของB6(50%ULDPE)หลังจากแช่ในไซลีนเป็นเวลา5วัน NRแสดงเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ส่วนช่องว่างที่ปรากฏคือส่วนของULDPEที่ละลายออกไป ลักษณะของ ULDPE(ช่องว่าง)ในรูปนี้ มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) เช่นเดียวกัน ดังนั้น ยางผสมNR/ULDPEในอัตราส่วนที่เท่ากันนี้ (50/50 wt/wt) มีมอร์โฟโลยีที่เรียกว่า เฟสต่อเนื่องร่วม (co-continuous phase) ในความเป็นจริงแล้วปริมาตรของULDPEในยางผสมจะมีมากกว่าปริมาตรของNR เนื่องจากความหนาแน่นของULDPEต่ำกว่า ลักษณะที่เป็นเฟสต่อเนื่องร่วมนี้ยังปรากฏในยางผสมNR/LLDPE (50/50 wt/wt)¹

ลักษณะที่เป็นเฟสต่อเนื่องร่วมนี้ยังปรากฏในB5(40%ULDPE) ดังแสดงในรูปที่6.3a ส่วนB4(30%ULDPE)แสดงมอร์โฟโลยีที่แตกต่างออกไปดังแสดงในรูปที่6.3b ULDPEเป็นเม็ดเล็ก ๆ(ช่องว่าง)กระจายไปทั่วNR ซึ่งเป็นลักษณะปกติที่ส่วนผสมที่น้อยกว่าจะมีลักษณะเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous phase) และส่วนผสมที่มากกว่าจะเป็นเฟสต่อเนื่อง มอร์โฟโลยีที่ปรากฏในยางผสมชนิดใหม่นี้ของทุกอัตราส่วน ไม่ขึ้นอยู่กักระยะเวลาในการแช่ไซลีน ยางผสมB4ที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติเหลวแสดงมอร์โฟโลยีเหมือนกับรูปที่6.3b

มอร์โฟโลยีที่ต่างกันอย่างเด่นชัดของยางผสมNR/ULDPE น่าจะส่งผลต่อความแตกต่างของคุณสมบัติบางประการ แต่ในที่นี้ยังไม่พบความแตกต่างอย่างเด่นชัดของคุณสมบัติที่ทดสอบระหว่างยางผสมชนิดใหม่ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน การศึกษานี้ยังสนับสนุนการสรุปผลในบทก่อนๆที่ว่า ยางผสมชนิดใหม่มีลักษณะเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี

การศึกษามอร์โฟโลยีที่จะกระทำต่อไปในอนาคตคือ ตรวจสอบการกระจายของสารเคมีต่างๆ ในยางผสมชนิดใหม่นี้ ถ้าหากมีการเติมเขม่าดำ(carbon black) จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบการกระจายตัวของเขม่าดำในยางผสมนี้ด้วย

¹ A. Abdullah et al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **58** (1995) 1125-1133.

6.3.2 ลักษณะการเป็นผลึก

รูปที่6.4-รูปที่6.6แสดงภาพเทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่องดีเอสซี ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่างๆและปริมาณผลึกสรุปในตารางที่6.1 ULDPPE-pelletหมายถึงเม็ดULDPPEที่ผลิตจากโรงงาน (as-received) ULDPPEมีลักษณะใส มีความไม่เป็นผลึกสูงมาก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) เนื่องมาจากการมีความหนาแน่นต่ำมาก สายโซ่โมเลกุลมีความไม่เป็นระเบียบสูง มีocteneเป็นโคโม่โนเมอร์ปริมาณถึง25% ทำให้ความสามารถในการเกิดเป็นผลึกต่ำมากกว่าLDPE LLDPE และHDPE แต่อย่างไรก็ตาม ความเป็นผลึกก็ยังสามารถตรวจพบได้ คือ ยังแสดงจุดหลอมเหลวอยู่ โดยที่มีพีคกว้างมาก(รูปที่6.4) กล่าวได้ว่าเริ่มมีการหลอมเหลวตั้งแต่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า และไปสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 74°C. ปริมาณผลึกน้อยมาก มีอยู่เพียง 10% จุดสูงสุดของช่วงหลอมเหลวคือ 44°C. ULDPPEที่ถูกทดสอบคุณสมบัติการดึงยืดแสดงลักษณะเช่นเดียวกับกับULDPPE-pellet (ตารางที่6.1) รูปร่างของเทอร์โมแกรมในรูปที่6.4เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ยางผสมB4-B6แสดงจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงเดียวกันกับULDPPE พื้นที่ใต้กราฟในรูปที่6.4แสดงถึงปริมาณผลึกเมื่อเทียบกับน้ำหนักทั้งหมดของชิ้นวิเคราะห์ ซึ่งในการคำนวณปริมาณผลึกนี้ ต้องพิจารณาจากน้ำหนักที่ปรากฏอยู่จริงของULDPPEในชิ้นวิเคราะห์นั้น ผลการคำนวณพบว่าปริมาณผลึกของULDPPEในยางผสมใกล้เคียงกับULDPPE-pellet

เทอร์โมแกรมที่วัดจาก cooling scan ของULDPPEในชิ้นงานต่างๆไม่แตกต่างกัน อุณหภูมิผลึก(crystallization temperature, T_c)อยู่ในช่วงเดียวกัน (33-35 °C.) และปริมาณผลึกไม่แตกต่างกันมากนัก เทอร์โมแกรมที่วัดจาก heating scan ในครั้งที่สองนี้ต่างจากที่วัดครั้งแรก คือ ในครั้งที่สองนี้จะมีปริมาณผลึกน้อยมาก ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความเป็นผลึกของโพลีเอททิลีนที่มีความหนาแน่นต่างๆนี้ สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิง [1-2]

6.4 สรุปผลการทดลอง

1. ยางผสมNR/ULDPPE แสดงลักษณะเฟสต่อเนื่องร่วม (co-continuous phase) ในยางผสมที่มี NR 50%และ 60%
2. พฤติกรรมด้านการเป็นผลึกของULDPPEในยางผสมไม่แตกต่างจากULDPPEที่บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

1. J. Minick, A. Moet, A. Hiltner, E. Baer and S. P. Chum, *J. Appl. Polym. Sci.*, **58**, 1371-1384 (1995).
2. S. Bensason, J. Minick, A. Moet, S. Chum, A. Hiltner and E. Baer, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.*, **B34**, 1301-1315 (1996).

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่องดีเอสซี(DSC)

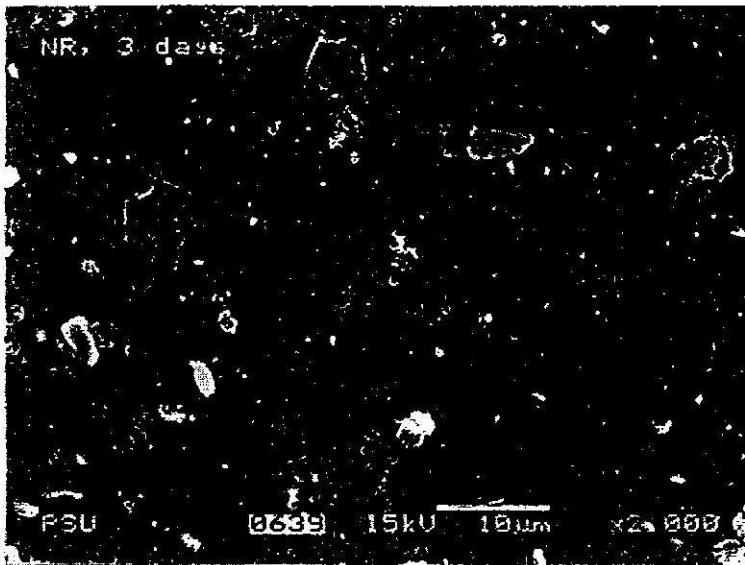
Sample	1 st Heating		1 st Cooling		2 nd Cooling	
	T _m ^a (°C)	%X ^b	T _c (°C)	%X ^b	T _m ^a (°C)	%X ^b
ULDPE ^c	44	9	35	10	52	6
ULDPE ^d	42	10	34	9	52	6
B4 ^d	45	6	33	6	54	2
B5 ^d	54	8	34	8	53	3
B6 ^d	41	9	34	9	53	3

^a maximum peak

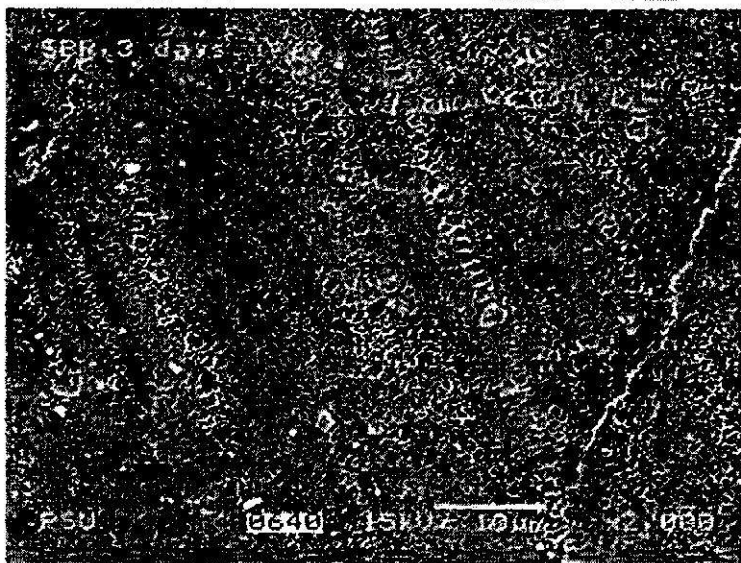
^b % crystallinity ($\Delta H_f = 292 \text{ J/g}$; Reference: B. Wunderlich, Macromolecular Physics Vol.3, Academic Press, New York, 1983, p. 42)

^c as received (pellet)

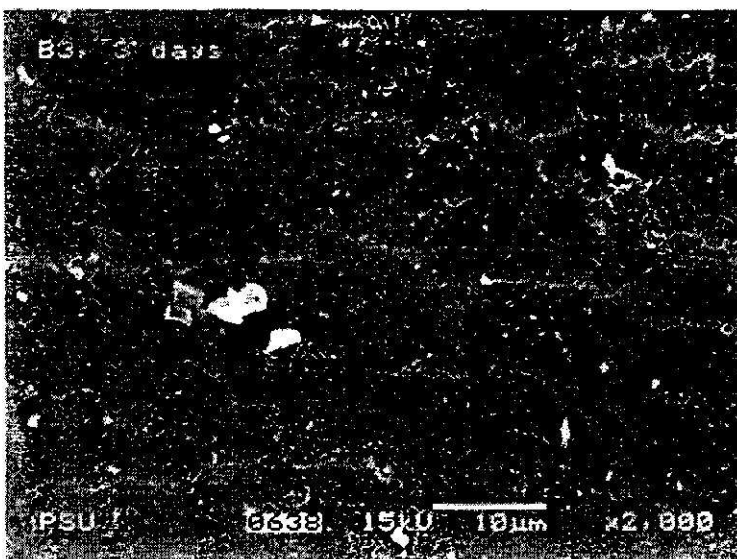
^d neck region of the tensile tested specimen



(a)



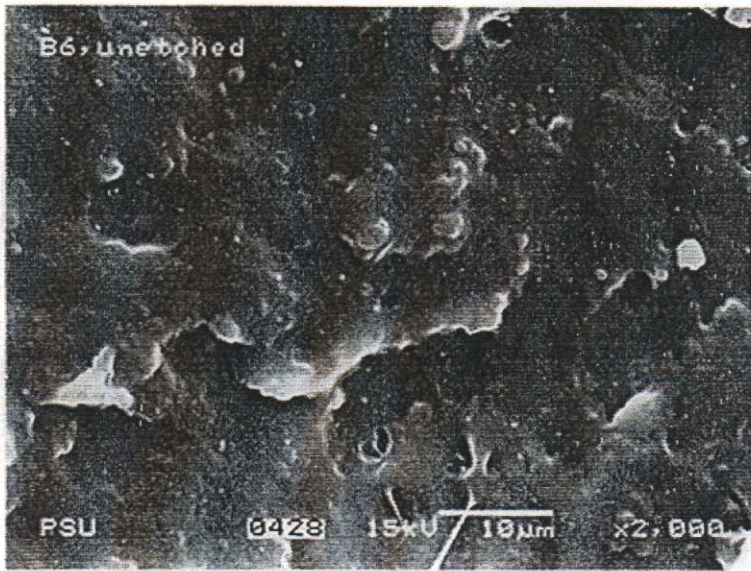
(b)



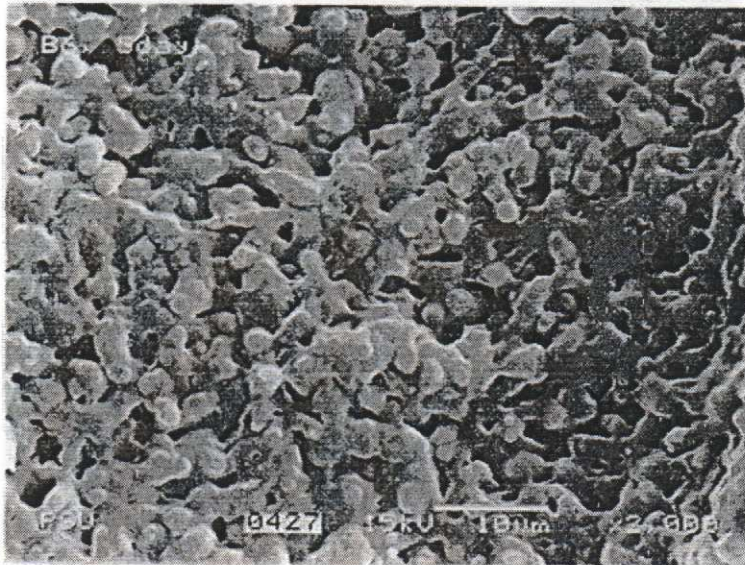
(c)

รูปที่ 6.1

ภาพถ่ายจากเครื่องSEMของชิ้นงานที่แช่ในพาราไซตินเป็นเวลา 3 วัน (a) NR; (b) SBR; (c) B3 (50%SBR)



(a)



(b)

รูปที่ 6.2

ภาพถ่ายจากเครื่องSEM ของB6 (50%ULDPE) (a) ชิ้นงานก่อนแช่พาราไซลีน; (b) ชิ้นงานที่แช่ในพาราไซลีนเป็นเวลา 5 วัน



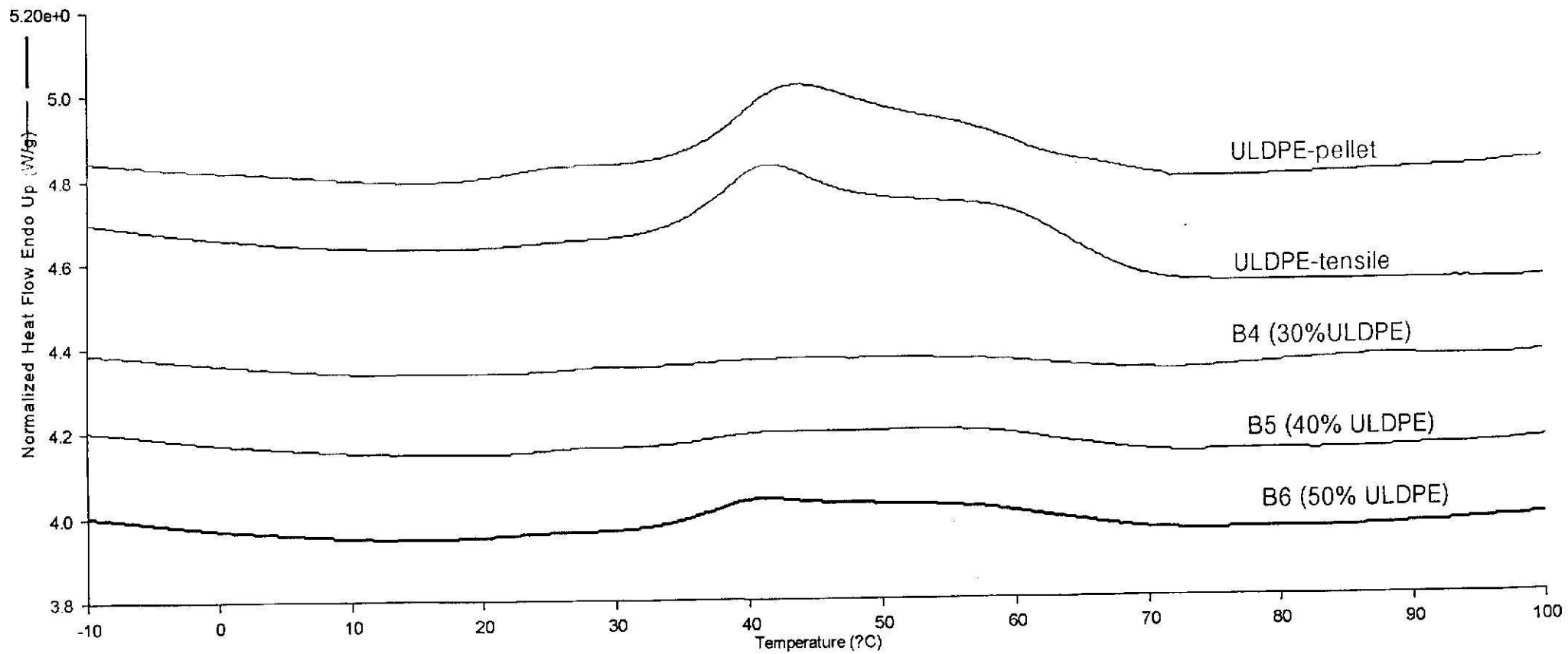
(a)



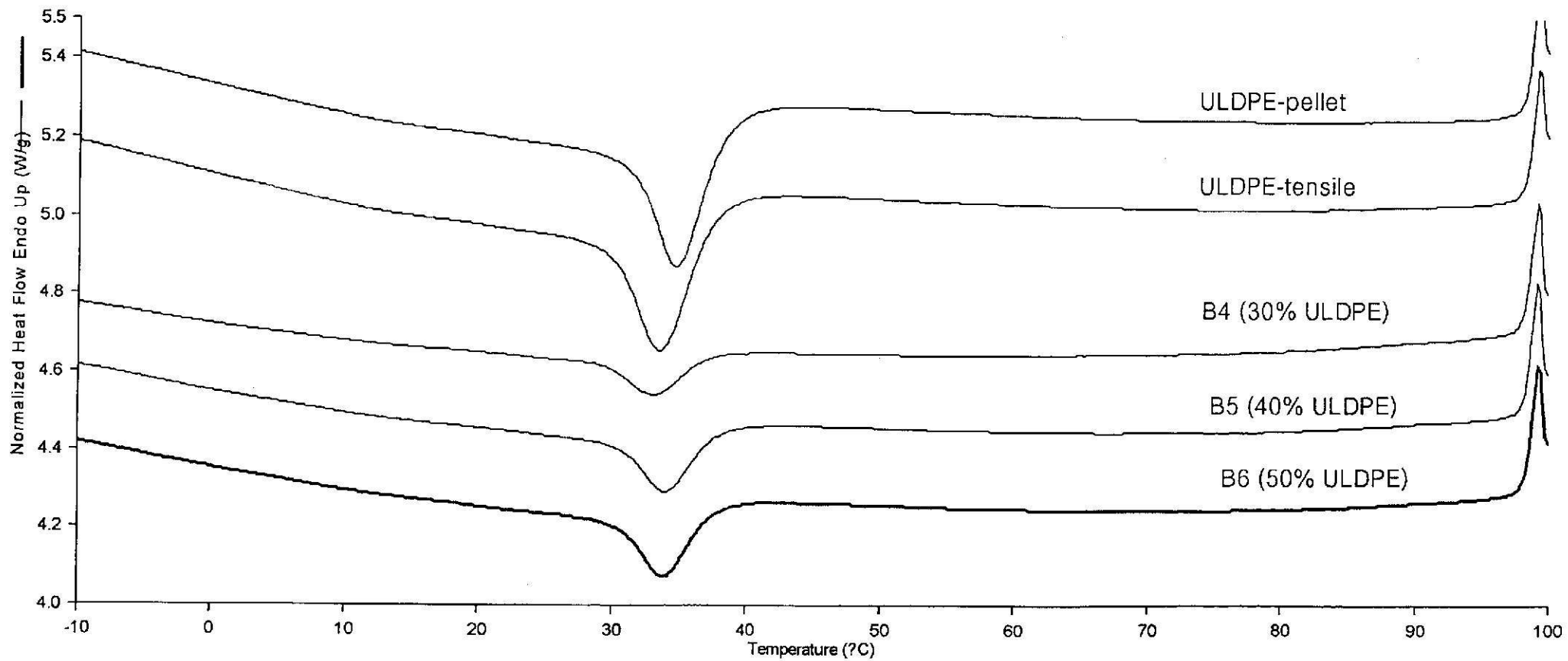
(b)

รูปที่ 6.3

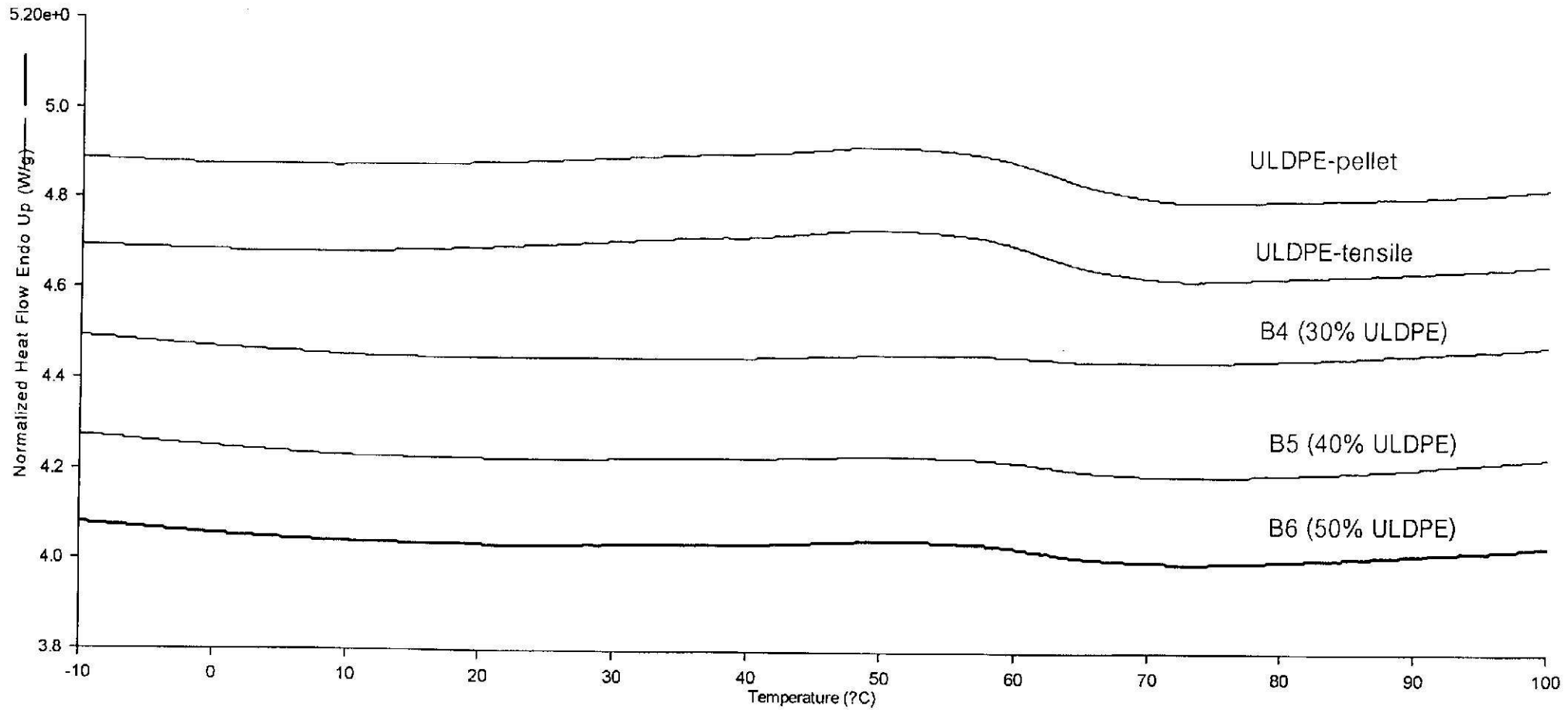
ภาพถ่ายจากเครื่องSEMของชิ้นงานที่แช่ในพาราไซตินเป็นเวลา 5 วัน (a) B5(40%ULDPE); (b) B4(30%ULDPE)



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)

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).