



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการ การเบรนด์อย่างธรรมชาติร่วมกับยางไนไตรด์คาร์บอกซิเลตเพื่อนำไป
ประยุกต์ใช้ผลิตท่ออย่างที่ทนความร้อนและน้ำมัน

โดย นางสาวณัฐนิ โล่พัฒนานนท์ และนายเกรียงไกร อรุณพันธ์

กันยายน 2551

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเบลดอย่างธรรมชาติร่วมกับยางไนไตรด์คาร์บอกซิเลตเพื่อนำไป
ประยุกต์ใช้ผลิตท่ออย่างที่ทนความร้อนและน้ำมัน

คณะผู้วิจัย

- นางสาวณัฐนิ โล่ห์พัฒนานนท์
- นายเกรียงไกร อรุณพันธ์

สังกัด

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการ วิจัยแห่งชาติยางพารา (SPR)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความคิดเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

- ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)** การเบลนด้อยางธรรมชาติร่วมกับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ผลิตท่อยางที่ทนความร้อนและน้ำมัน
(ภาษาอังกฤษ) Study of Natural rubber/Carboxylated Nitrile Rubber Blends for heat and oil resistant rubber tube application
- ชื่อหัวหน้าโครงการ** ดร.ณัฐณี โล่ห์พัฒนานนท์
หน่วยงานสังกัด ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อ.เมือง จ.ปัตตานี 94000
โทรศัพท์/โทรสาร 073-313930-50 ต่อ 1862 / 073-331099 **E-mail** lnatinee@bunga.pn.psu.ac.th
- นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย** นายเกรียงไกร อรุณพันธุ์
- ระยะเวลาดำเนินการ** 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2550 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2551

6. ปัญหาที่ทําวิจัยและความสำคัญ

การวิจัยนี้เพื่อการศึกษาเบื้องต้นเพื่อพัฒนาวัสดุเบลนดชนิดใหม่ที่ใช้ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ร่วมกับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (carboxylated nitrile rubber, XNBR) ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีความสำคัญและมีราคาแพง มีคุณสมบัติทั่วไปในด้านทนความร้อนและน้ำมัน จึงมักใช้ทำผลิตภัณฑ์หลายชนิดในอุตสาหกรรมยานยนต์ ดังนั้น การศึกษาได้เน้นประเด็นของการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางเบลนดชนิดนี้เพื่อแก้ปัญหาเรื่องต้นทุนการผลิตและพลังงาน ลดปริมาณการใช้และการนำเข้ายางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตได้ในระดับหนึ่ง ตลอดจนศึกษาปัจจัยการผลิตและแปรูปในเบื้องต้นเพื่อทำเป็นท่อยางที่สามารถทนความร้อนและน้ำมัน ซึ่งข้อมูลจากงานวิจัยนี้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับแนวทางการผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมันในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

7. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเทคนิคการเตรียมและสมบัติของยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต สำหรับใช้ผลิตท่อยางทนความร้อนและน้ำมัน

8. ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตโดยแปรอัตราส่วนการเบลนด (NR/XNBR = 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 และ 100/0 %wt/wt) ชนิดสารตัวเร่ง (TMTD+ZnO 5 phr, CBS+ZnO 5 phr, MBTS+ZnO 5 phr, CBS+TMTD+ZnO 5 phr, MBTS+TMTD+ZnO 5 phr และ CBS+TMTD+ZnO 10 phr) แปรชนิดและปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50) แปรชนิดและปริมาณสารตัวเติม (carbon black เกรด N220, silica และ CaCO₃) ต่อสมบัติของยางเบลนด NR/XNBR ผลการศึกษา พบว่าในการศึกษาเบื้องต้นของยางเบลนดที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กัมมะถัน Semi-EV และใช้สารตัวเร่งคือ TMTD ได้ว่ายางเบลนดมีสมบัติวัลคาไนซ์ที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเบลนด โดยมีเวลาสกอซ เวลาวัลคาไนซ์และค่าทอร์คสูงสุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ XNBR แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลงตามปริมาณของยาง XNBR สมบัติความต้านทานต่อการบ่มเร่งและความต้านทานต่อการบวมพองจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของยาง XNBR และจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA และ SEM พบว่ายางเบลนด NR/XNBR มีความไม่เข้ากัน และเมื่อพิจารณาสมบัติต่างๆ ของยางที่เบลนดกันในสัดส่วนต่างๆ พบว่ายางเบลนดที่ใช้สัดส่วนของยาง NR ต่อ

ยาง XNBR เท่ากับ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก มีสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความต้านทานต่อความร้อนและการบวมพองในตัวทำละลายไม่มีขั้วดีที่สุด อย่างไรก็ตาม พบว่าสมบัติของยางเบลนด์ที่ใช้สูตรเบลนด์ดังกล่าวสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการใช้สารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสม จากผลการแปรชนิดของสารตัวเร่งในระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถัน Semi-EV ต่อสมบัติของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR พบว่าการใช้สารตัวเร่งหลัก CBS ร่วมกับสารตัวเร่งรอง TMTD และเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางเบลนด์จาก 5 phr เป็น 10 phr มีประสิทธิภาพดี เนื่องจากให้ความปลอดภัยในการแปรรูป (ประมาณ 3 นาที) และมีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่ค่อนข้างเร็ว (ประมาณ 6 นาที) นอกจากนี้ยังให้ยางที่มีระดับการเชื่อมโยงที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเร่งชนิดอื่น ซึ่งทำให้ยางเบลนด์มีความต้านทานต่อแรงดึง (14 MPa) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (22 N/mm) มากที่สุด มีความสามารถในการยืดขาด (ประมาณ 450 %) และสมบัติบ่มแรงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เนื่องจากในการผสมยาง NR และยาง XNBR พบว่ายางทั้งสองเข้ากันได้เล็กน้อย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้หากมีการเพิ่มระดับความเข้ากันได้ของยางทั้งสอง เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ให้เด่นยิ่งขึ้น ผลการแปรชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ ยางธรรมชาติอีพอกซีไธด์เกรด Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50 ต่อสมบัติของยางเบลนด์ พบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ส่งผลให้ยาง NR และยาง XNBR มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของทั้งสองเพิ่มขึ้น และการใช้ยาง Epoxyprene® 50 ส่งผลให้ยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR มีความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายไม่มีสภาพขั้วดีกว่ากรณียางเบลนด์ที่ใช้ยาง Epoxyprene® 25 ปริมาณของยาง Epoxyprene® 50 ที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางเบลนด์ คือ 0.5 phr หลังจากนั้นเมื่อนำยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR มาเสริมประสิทธิภาพด้วยสารตัวเติม ได้แก่ เขม่าดำ (N220) ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณเท่ากัน 30 phr พบว่าเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่สามารถเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงและการฉีกขาดให้แก่ยางเบลนด์ได้ และมีประสิทธิภาพดีกว่าซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะเขม่าดำสามารถกระจายตัวในเนื้อยางได้สม่ำเสมอดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น การเพิ่มปริมาณเขม่าดำจาก 15, 30 และ 40 phr ส่งผลให้ยางเบลนด์มีความต้านทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด รวมถึงการทนต่อตัวทำละลายดีขึ้น แต่มีความสามารถในการยืดขาดลดลง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เขม่าดำในปริมาณ 30 phr ทำให้ได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ดี มีความยืดหยุ่น และต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายได้ดี โดยมีความต้านทานต่อความร้อนไม่แตกต่างมากนักจากยางไนไตรล์คาร์บอกรีล และในขณะที่ยางก็มีความต้านทานต่อตัวทำละลาย หรือน้ำมันที่ดีกว่ามาก หลังจากนั้นได้เตรียมยางเบลนด์ที่ใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งสรุปได้ว่าความผสมยางทั้งสองโดยใช้เทคนิคการผสมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ใช้อัตราส่วนเบลนด์ NR/XNBR = 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้สารตัวเร่ง CBS (1.0 phr)+TMTD (0.5 phr) ร่วมกับ ZnO 10 phr ในระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถันชนิด Semi-EV ใช้ Epoxyprene® 50 ปริมาณเพียง 0.5 phr และควรใช้เขม่าดำปริมาณ 30 phr เป็นสารตัวเติม เพื่อผลิตท่อยางที่มีสมบัติใกล้เคียงกับยางเบลนด์ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว จากการศึกษาถึงผลการแปรอัตราเงื่อนไข (30, 40 และ 50 รอบต่อนาที) และอุณหภูมิ (80, 90 และ 100°C) ต่อเอกซ์ทรูดท่อยาง โดยพิจารณาค่าการบวมพองคายและลักษณะทางกายภาพของท่อยางเบลนด์ พบว่าการบวมพองคายและผิวของท่อยางที่ผ่านการเอกซ์ทรูดไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งสองประการ ท่อยางที่ได้มีผิวเรียบสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและเวลาในการผลิตควรเลือกใช้อัตราเงื่อนไขและอุณหภูมิการเอกซ์ทรูด คือ 40 รอบต่อนาที และ 80°C

9. สรุปผลการวิจัย

การเบลนด์ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกรีลเป็นวิธีการประดิษฐ์วัสดุยางชนิดใหม่ให้มีสมบัติเด่นของยางทั้งสอง และราคาถูก ในการวิจัยนี้ศึกษาการใช้ยางทั้งสองร่วมกันโดยปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการเบลนด์ของยางทั้งสองชนิดเพื่อให้ได้ยางเบลนด์ที่มีประสิทธิภาพดี เหมาะสำหรับการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ท่อยางทนความร้อนและน้ำมัน จากการ

ศึกษาวิจัยสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเบลนด้อยาง คือใช้สัดส่วนเบลนด NR/XNBR เท่ากับ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้สารตัวเร่ง CBS+TMTD และใช้ ZnO 10 phr ใช้ Epoxyprene® 50 ในปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ และใช้ เชม์ดำเกรด N220 ปริมาณ 30 phr ในการเตรียมวัสดุเบลนด และควรเอกซ์ทรูดตัวอย่างด้วยความเร็วรอบสกรู 40 รอบต่อนาที (rpm) ที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อประหยัดเวลาและพลังงานในการผลิตต่อจากยางเบลนด NR/XNBR

10. ข้อเสนอแนะ

1 ศึกษาการเบลนดของยาง 3 ชนิดร่วมกัน คือ ยาง NR ยาง XNBR และยาง ENR เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทนน้ำมันและความร้อนที่เสริมจากการใช้ยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุล คือยาง ENR ร่วมในสูตรยางเบลนด

2 ศึกษาวิจัยหาวิธีพัฒนาการผลิตตัวอย่างและผลิตภัณฑ์อื่นจากยางเบลนด NR/XNBR โดยการออกแบบกระบวนการผลิตและแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม และทดสอบการใช้งานที่สภาวะใช้งานจริง

การเบลนด้อยางธรรมชาติร่วมกับยางไนไตรล์คาร์บอซีเลตเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนและน้ำมัน

บทคัดย่อ

เตรียมเบลนด์ของยางธรรมชาติ (NR) และยางไนไตรล์คาร์บอซีเลต (XNBR) ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ (NR/XNBR : 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 and 100/0 %wt/wt) ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งโดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันแบบ Semi-EV ศึกษาผลของการแปรสัณฐานเบลนด์ ชนิดสารตัวเร่ง ปริมาณซิงค์ออกไซด์ ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้และชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติบ่มเร่ง ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ จากผลการศึกษาพบว่า ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดขาดลดลงตามปริมาณของยาง XNBR แต่สมบัติบ่มเร่งด้วยความร้อนและความต้านทานต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค DMTA และ SEM พบว่ายางเบลนด์มีความไม่เข้ากัน ยางเบลนด์ที่มีการใช้สารตัวเร่งต่างชนิดกันและเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่างกัน มีสมบัติวัลคาไนซ์และเชิงกลที่แตกต่างกันไป ผลการใช้ Epoxyprrene® 25 and Epoxyprrene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและสภาพของยางเบลนด์ให้ดีขึ้น พบว่าการใช้ Epoxyprrene® 50 ในยางเบลนด์จะเพิ่มความเข้ากันได้มากกว่าการใช้ Epoxyprrene® 25 ทำให้ยางเบลนด์แสดงสมบัติเชิงกล บ่มเร่งและการต้านทานต่อตัวทำละลายได้เด่นกว่า และพบว่าการเติม Epoxyprrene® 50 ในปริมาณ 0.5 phr ได้เพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด สมบัติบ่มเร่ง ความต้านทานต่อตัวทำละลาย ผลการใช้สารตัวเติมสามชนิด ได้แก่ เชม่าดำ เกรด N220 ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเสริมประสิทธิภาพให้แก่ยางเบลนด์ พบว่าเชม่าดำจะให้ผลการเสริมประสิทธิภาพดีที่สุดจากการพิจารณาความต้านทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายของยางเบลนด์ และการเสริมประสิทธิภาพด้วยเชม่าดำนี้พบว่ามีแนวโน้มอยู่ปริมาณเช่นกัน การเติมเชม่าดำปริมาณ 30 phr ได้ให้สมบัติของยางเบลนด์ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่าเมื่อนำเบลนด์ NR/XNBR ที่ผสมโดยใช้สูตรยางคอมปาวด์ที่เหมาะสมมาขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องเอกซทรูดแบบสกรูเดี่ยว พบว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การบวมพองคายและผิวของท่อที่เอกซทรูดได้

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, ยางไนไตรล์คาร์บอซีเลต, ยางเบลนด์, สมบัติเชิงกล, พื้นฐานวิทยา

Study of Natural rubber/Carboxylated Nitrile Rubber Blends for heat and oil resistant rubber tube application

Abstract

Blends of natural rubber (NR) and carboxylated nitrile rubber (XNBR) with different compositions (NR/XNBR : 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 and 100/0 %wt/wt) were prepared on laboratory two-roll mill. Rubber blends were then vulcanized using Semi-EV vulcanizing system. The effect of blend ratio, type of accelerator, amount of zinc oxide, type and amount of compatibilizer and filler on the cure characteristics, mechanical properties, ageing properties and solvent resistant properties of NR/XNBR blends were examined. The results showed that tensile strength and elongation at break of the blends decreased with increasing XNBR content, but thermal ageing and solvent resistant properties increased. The blends of NR with XNBR were incompatible as studied by using DMTA and SEM techniques. The blends added with different accelerators and zinc oxide content showed different cure and mechanical properties. Epoxyprene[®] 25 and Epoxyprene[®] 50 were used as compatibilizers to enhance the properties of the blends. The blends added with Epoxyprene[®] 50 showed better compatibility, which gave rise to higher improvement level in mechanical, ageing and solvent resistant properties when compared with those incorporated with Epoxyprene[®] 25. Furthermore, it was found that an addition of 0.5 phr Epoxyprene[®] 50 increased tensile strength, elongation at break, tear strength, ageing properties and solvent resistant properties. Three kinds of fillers including carbon black (N220), silica and calcium carbonate were used to reinforce the NR/XNBR blends. It was found that carbon black (N220) gave the best results in term of tensile strength, tear strength, heat and solvent resistance. For the blends reinforced with N220 carbon black, the level of reinforcement also depended on carbon black content. The incorporation of 30 phr carbon black seemed to give blends with acceptable properties. Based on the above finding, the rubber hose obtained from the NR/XNBR blends with suitable formula were extruded using single-screw extrusion. In extrusion process, it was found that the temperature and rotor speed did not significant affect the die swell and outer surface of rubber hose.

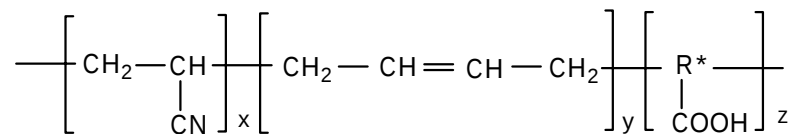
Keyword : Natural rubber, carboxylated nitrile rubber, rubber blend, mechanical property, morphology

เนื้อหา

1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าในปัจจุบันประเทศไทยได้กลายเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติที่สำคัญและมากเป็นลำดับที่หนึ่งของโลก แต่ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ที่ผลิตในประเทศจะส่งออกในรูปยางดิบเป็นหลัก ปริมาณของยางธรรมชาติที่ผลิตเป็นยางดิบค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับปริมาณของยางที่มีการนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่สามารถเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติได้มากกว่า ยางธรรมชาติสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงมือ ที่นอน ตุ๊กตายาง จนถึง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานด้านวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสสะพาน เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นที่ดี แต่ในขณะเดียวกันยางธรรมชาติจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเมื่อถูกกระทำด้วยออกซิเจน โอโซน ความร้อนและน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีความไม่อิ่มตัวในโครงสร้างและประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นไฮโดรคาร์บอนล้วน

ยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (Carboxylated Nitrile Rubber, XNBR) จัดเป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญมากชนิดหนึ่งในเชิงพาณิชย์ มีส่วนประกอบของโครงสร้างที่เป็นพอลิอะคริโลไนไตรล์ พอลิบิวทาไดอิน และกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid, -COOH)



จากโครงสร้างข้างต้นทำให้ยางชนิดนี้มีสมบัติต่างๆ ไปคล้ายกับยางไนไตรล์ แต่เนื่องจากหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่อยู่ในโครงสร้าง ส่งผลให้ยางนี้มีความทนต่อน้ำมันและการสึกหรอมากกว่ายางไนไตรล์ปกติ นอกจากนี้ หมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่กระจายอยู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิก (ionic crosslinking) ($\text{COO}^- \text{---} \text{Zn}^{2+} \text{---} \text{OOC}$) การเสริมแรงของยางด้วยพันธะไอออนิกร่วมกับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันทำให้ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัส (modulus) ความแข็ง (hardness) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion resistance) สูงขึ้นกว่าปกติเป็นพิเศษ (Chakraborty *et al.*, 1981; Chakraborty and DE, 1983; Ibarra, 1999; Ibarra and Alzoriz, 2000) ยางชนิดนี้จึงถูกใช้งานเฉพาะทางในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น การทำท่อส่งน้ำมัน สายพานรถยนต์ ปะเก็น เป็นต้น แต่ยาง XNBR มีราคาแพงเนื่องจากเป็นยางที่มีต้นทุนการผลิตสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ยางชนิดนี้ต้องคำนึงถึงการแข่งขันกันในเรื่องของราคาผลิตภัณฑ์นอกเหนือไปจากคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์จากยางชนิดนี้ และแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิตทำได้โดยการเบลนด์ยาง XNBR กับยาง NR แต่อย่างไรก็ตาม ยาง NR และยาง XNBR มีสภาพขั้วที่แตกต่างกันจึงผสมเข้ากันได้น้อย ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติ (จันทร์สมร, 2549) นอกจากนี้สมบัติของเบลนด์สามารถที่จะถูกปรับให้เหมาะต่อการใช้งานได้หากเลือกใช้สัดส่วนเบลนด์ ระบบวัล

คาไนซ์ ชนิดและปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสม และการใช้สารตัวเติมเพื่อเสริมประสิทธิภาพของยางเบลนด์จะเป็นแนวทางสนับสนุนการปรับปรุงสมบัติของเบลนด์ให้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาสมบัติยางเบลนด์ของยางธรรมชาติกับยางคาร์บอกซีเลตไนไตรล์ โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นต่อสมบัติเบลนด์ เพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมในการผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมัน

2 วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคการเตรียมยางเบลนด์และสมบัติของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางไนไตรล์คาร์บอกซีเลต (XNBR)

2.2 เพื่อผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมัน และหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากยางเบลนด์ NR/XNBR

3 ทฤษฎีแนวคิดในการทำวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมวัสดุยางใหม่ ๆ เพื่อใช้งานเฉพาะทางในปัจจุบัน มีแนวโน้มพัฒนาจากยางเบลนด์โดยการผสมยางชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วควบคุมให้เกิดรูปร่างเฟส ขนาดของเฟส การยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ต่างชนิดที่ต้องการ ทำให้สามารถผลิตวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติหลากหลาย ที่สามารถสนองความต้องการในการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งใช้เทคโนโลยีการเบลนด์อย่างง่าย ๆ ไม่มีความซับซ้อน การลงทุนและความพยายามที่มากกว่าการสังเคราะห์ยางชนิดใหม่ สมบัติที่ได้รับการปรับปรุงเนื่องจากการเบลนด์ เช่น ความง่ายในการแปรรูป (processability) การทนทานต่อความร้อนและสารเคมี ทนทานต่อการกระแทกและการดึง และสมบัติเชิงกลอื่นๆ เป็นต้น ในการเตรียมยางเบลนด์ จะพิจารณาความเข้ากันได้ (compatibility) ของการผสมเป็นหลัก (Bonner and Hope, 1993) ดังนั้นการเข้ากันได้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมยางเบลนด์ การผสมยางที่เข้ากันไม่ได้หรือเข้ากันได้ไม่ดี จะส่งผลเสียต่อสมบัติของยางเบลนด์ เนื่องจากเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ จึงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่เกิดการแตกหักได้ง่าย สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ด้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาเบลนด์ ในโครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของการเตรียม เช่น เทคนิคการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ การแปรปริมาณของยาง NR และ XNBR ในเบลนด์ การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ NR และ XNBR และการใช้สารตัวเติม เช่น เชม์ดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต ต่อสมบัติการแปรรูป สมบัติเชิงกลและบ่มเร่ง การทนต่อน้ำมัน และความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ ตลอดจนเทคนิคการผลิตท่ออย่างด้วยการเอกซ์ทรูดเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุยางชนิดใหม่จากยางธรรมชาติและไนไตรล์คาร์บอกซีเลตที่สามารถนำไปเตรียมเป็นท่อยาง หรือผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนและน้ำมันประเภทอื่น จากการค้นคว้ารายงานวิจัยที่ศึกษาการเบลนด์ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกซีเลต พบว่ามีการกล่าวรายงานว่าการนำยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกซีเลตมาเบลนด์ด้วยสัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ให้ผลดังต่อไปนี้ คือ สมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์คู่นี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางไนไตรล์คาร์บอกซีเลต แต่ยางเบลนด์ NR/XNBR มีความเข้ากันได้ต่ำ จึงพยายามแก้ปัญหาด้วยการใช้สารตัวเร่งที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ คือ ไบโอฟอสฟอริลไดซัลไฟด์ (bis(diisopropyl) thiophosphoryl disulfide, DIPDIS) เปรียบเทียบกับสารตัวเร่ง TMTD ผลการศึกษาพบว่าการใช้ DIPDIS ให้ยางเบ

ลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันได้ดีกว่า TMTD เนื่องจาก DIPDIS สามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างยางไนไตรด์คาร์บอกซิเลตกับยางธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางทั้งสองชนิด (Naskar *et al.*, 1994) ต่อมากลุ่มคณะวิจัยของ Naskar *et al.* (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซัลเฟอร์ในสารตัวเร่งกลุ่มไฮโอฟอสฟอริลพอลิซัลไฟด์ 2 ชนิด คือ bis(diisopropyl) thiophosphoryl trisulfide (DIPTRI) และ bis (diisopropyl) thiophosphoryl tetrasulfide (DIPTET) พบว่าเมื่อจำนวนซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น อัตราและระดับการวัลคาไนซ์ยางเบลนด์เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ยางคาร์บอกซิเลตไนไตรด์กับยางธรรมชาติ จากผลงานวิจัยเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าการใช้ยาง NR และ ยาง XNBR ร่วมกันจำเป็นต้องอาศัยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างเฟสยางทั้งสอง ดังนั้นการเพิ่มความเข้ากันได้ในกลุ่มยางเบลนด์นี้สามารถทำได้โดยเลือกใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ซึ่งมีส่วนของหมู่วงไวโอพอกไซด์ที่สามารถเกิดอันตรกริยากับหมู่กรดของยาง XNBR (Alex *et al.*, 1991) และสายโซ่หลักของโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโครงสร้างที่คล้ายกับยางธรรมชาติ จึงคาดว่าส่งผลให้ความเข้ากันได้ของยาง NR และยาง XNBR เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มสมบัติของยางเบลนด์ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล นอกจากนี้การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมเขม่าดำ ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับยางเบลนด์ชนิดนี้เป็นแนวทางเพิ่มเติมในการปรับปรุงสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล โดยจากรายงานวิจัยของ Alex *et al.* ในปี 1991 ได้กล่าวว่าการเติมสารตัวเติมเขม่าดำ 2 เกรด ได้แก่ ISAF และ SRF และซิลิกา เกรด Vulcasil S ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกลของเบลนด์ ENR/neoprene/XNBR ผลการศึกษาพบว่าสมบัติวัลคาไนซ์ และเชิงกลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของยางแต่ละชนิดและชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเทนไซล์ การเซตตัวเนื่องจากการกดอัด (compression set) และการต้านทานต่อการสึกหรอของเบลนด์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเบลนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม Chakraborty and DE (1983) ได้ศึกษาผลของการเติมเขม่าดำต่อสมบัติและรูปแบบการวิบัติ (failure modes) ของยาง XNBR ซึ่งใช้ระบบวัลคาไนซ์ชนิดใช้กำมะถันและใช้เปอร์ออกไซด์ เมื่อเติมเขม่าดำปริมาณต่างๆ ลงในยาง XNBR พบว่าสมบัติเชิงกลของยางเค้นขึ้น โดยการเติมเขม่าดำในปริมาณน้อยๆ จะให้สมบัติของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ในกรณีที่มีการเติมเขม่าดำในปริมาณมากขึ้น พบว่าสมบัติของยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากผลของการเกิดอันตรกริยาระหว่างยางและสารตัวเติมเด่นมากกว่าผลของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้จะให้สูตรยางเบลนด์ที่เหมาะสมต่อการเอ็กซ์ทรูดอย่างทนน้ำมันและความร้อน ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อการใช้ และมีความเป็นไปได้ในการนำผลงานวิจัยจากการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ต่อไปในการผลิตท่อทนน้ำมันหรือผลิตภัณฑ์ที่ทนน้ำมันและความร้อนจากยางเบลนด์นี้เข้าสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

4. วิธีการ

4.1 การเตรียมยางธรรมชาติ

นำยางแผ่นรมควันชั้น 3 (Ribbed smoked sheet 3) ซึ่งผลิตโดยกลุ่มเกษตรกรกรรควนปิ่นเต ตำบลควนขนุน จังหวัดพัทลุงมาบดผ่านลูกกลิ้ง 70 รอบ ที่อุณหภูมิห้องเพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง ให้มีความหนืดหนูนีที่ 100 องศาเซลเซียส (ML₁₊₄, 100) เท่ากับ 40-46 ก่อนที่จะนำไปเบลนด์ร่วมกับยาง XNBR (เกรด Nipol NX775

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอะคริโลไนไตรล์ของบิวตาไดอินประมาณ 26.15 เปอร์เซ็นต์โมล และมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิก 7 เปอร์เซ็นต์โมล มีค่าความหนืดที่ ML_{1+4} ที่ 100 °C เท่ากับ 44-46 และมีความถ่วงจำเพาะ 0.98 ผลิตโดยบริษัท Zeon ประเทศไทย)

4.2 การเตรียมและการศึกษาสมบัติเบลนด์ของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (NR/XNBR)

4.2.1 ศึกษาผลของสัดส่วนเบลนด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

เตรียมคอมปาวด์ของยาง NR, XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR ที่อัตราส่วนการเบลนด์ NR/XNBR เท่ากับ 75/25, 50/50 และ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนักตามสูตรในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สูตรคอมปาวด์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ในระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV

สารเคมี	ปริมาณ (phr)				
NR	100	75	50	25	0
XNBR	0	25	50	75	100
ZnO	5	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1	1
TMTD	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulphur	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

การเตรียมยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติหรือคอมปาวด์ของยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต เริ่มจากนำยางจากขั้นตอนที่ 4.1 ที่ผ่านการพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10-15 นาที มาผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง โดยใช้ขั้นตอนการผสมดังนี้ คือ บดยาง NR หรือ XNBR ให้พ่นลูกกลิ้ง 3 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ใส่ Sulphur บดผสมเป็นเวลา 10 นาที ผ่านยางทางปลาย 5 รอบ แล้วพักยางทิ้งไว้ 10 นาที นำยางมาบดให้พ่นลูกกลิ้ง 1 นาที ใส่ Stearic acid บดผสมเป็นเวลา 2 นาที ใส่สารตัวเร่ง TMTD บดผสมเป็นเวลา 3 นาที ใส่ ZnO บดผสมเป็นเวลา 10 นาที ผ่านยางทางปลาย 5 รอบ ก่อนที่จะออกแผ่นตามความหนาที่ต้องการ สำหรับการเตรียมยางคอมปาวด์ของเบลนด์เริ่มจากบดยาง XNBR ให้พ่นลูกกลิ้ง 3 นาที ใส่ Sulphur บดผสมเป็นเวลา 10 นาที ผ่านยางทางปลาย 5 รอบ พักยางทิ้งไว้ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำยาง NR ที่ลดน้ำหนักโมเลกุลมาบดผสมกับยาง XNBR ให้พ่นลูกกลิ้งเป็นเวลา 1 นาที ใส่ Stearic acid บดผสมเป็นเวลา 2 นาที ใส่สารตัวเร่งบดผสมเป็นเวลา 3 นาที ใส่ ZnO ผสมเป็นเวลา 10 นาที (ถ้ามีสารตัวเติม ก็ให้เติมหลังจากเติม stearic acid แล้ว โดยบดผสมสารตัวเติมกับยางเบลนด์เป็นเวลา 5 นาที) แล้วผ่านยางทางปลาย 5 ครั้ง ก่อนออกแผ่นตามความหนาที่ต้องการ นำคอมปาวด์ NR, XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก โดยใช้เวลาการอัดเบ้าจากการทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 นำแผ่นยางที่อัดเบ้าตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาตัดชิ้น

ทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติเทนไซล์ตามมาตรฐาน ASTM D412-98a สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624-98 สมบัติความต้านทานต่อการบ่มเร่งตามมาตรฐาน ASTM D412-51T ความต้านทานต่อการบวมพองตามมาตรฐาน ASTM D 573-81 และความเข้ากันได้โดยการศึกษาสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเทคนิค DMTA และ SEM

4.2.2 ศึกษาผลของสารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลด NR/XNBR

ในขั้นตอนการศึกษานี้เลือกใช้สัดส่วนเบลดที่เหมาะสมจากการศึกษาสัดส่วนเบลดในขั้นตอนที่ 4.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลด โดยบดผสมยาง NR และ XNBR และเติม sulphur, ZnO, Stearic acid และสารตัวเร่งชนิดต่างๆ ได้แก่ ทีเอ็มทีดี (TMTD), ซีบีเอส (CBS) และเอ็มบีทีเอส (MBTS) ตามสูตรในตารางที่ 4.2 และวิธีการตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.2 สูตรคอมปาวด์ของยางเบลด NR/XNBR ซึ่งแปรชนิดสารตัวเร่ง คือ TMTD, CBS และ MBTS ในระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV

สารเคมี	ปริมาณ (phr)					
NR/XNBR	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	10
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
TMTD	1.5	-	-	0.5	0.5	0.5
CBS	-	1.5	-	1.0	-	1.0
MBTS	-	-	1.5	-	1.0	-
Sulphur	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

จากนั้นนำคอมปาวด์ NR/XNBR ไปหาสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อัดเบ้ายางเบลดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ แล้วจึงทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อหาสารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการเบลดยาง NR และ XNBR ในหัวข้อต่อไป

4.2.3 ศึกษาผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของยางเบลด NR/XNBR

เตรียมคอมปาวด์ของยางเบลด NR/XNBR โดยเลือกใช้สัดส่วนเบลด สารตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนการศึกษาที่ 4.2.1 – 4.2.2 และเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ ยางธรรมชาติอีพอกไซค์ที่มีหมู่อีพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล (Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50) ในปริมาณ 0.5 และ 1 phr ตามตารางที่ 4.3 และขั้นตอนการผสมตามวิธีการที่ให้รายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 โดยนำสารเพิ่มความเข้ากันได้บดผสมพร้อมกับการบดผสมยาง NR และยาง XNBR ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

ตารางที่ 4.3 สูตรคอมเปาว์ดของยางเบลนด์ NR/XNBR ซึ่งใช้ยางธรรมชาติฟอกไซค์ที่มีหมู่ฟอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล (Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	
NR/XNBR	100	100
Epoxyprene® 25	0.5 และ 1	-
Epoxyprene® 50	-	0.5 และ 1
ZnO	10	10
Stearic acid	1	1
CBS+TMTD	1.5	1.5
Sulphur	1.2	1.2

เตรียมขึ้นทดสอบยางเบลนด์ตามวิธีการในหัวข้อที่ 4.2.1 นำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมสำหรับยางเบลนด์ NR และ XNBR ในหัวข้อต่อไป

4.2.4 ศึกษาผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

เตรียมคอมเปาว์ดของยางเบลนด์ระหว่าง NR/XNBR ใช้สูตรที่เหมาะสมจากการศึกษาจากหัวข้อที่ 4.2.1 – 4.2.3 และแปรชนิดสารตัวเติม คือ เหม่ดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามตารางที่ 4.4 และใช้ขั้นตอนการบดผสมตามระเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.4 สูตรคอมเปาว์ดของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่ผสมสารตัวเติม เหม่ดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

สารเคมี	ปริมาณ (phr)		
NR/XNBR	100	100	100
Compatibilizer	0.5	0.5	0.5
ZnO	10	10	10
Stearic acid	1	1	1
N 220	30	-	-
Silica	-	30	-
CaCO ₃	-	-	30
CBS+TMTD	1.5	1.5	1.5
Sulphur	1.2	1.2	1.2

อัดเบ้ายางเบลนด์ และเตรียมขึ้นทดสอบก่อนนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ เพื่อหาชนิดของสารตัวเติมที่เหมาะสมสำหรับยางเบลนด์ NR และ XNBR หลังจากนั้นเตรียมคอมเปาว์ดโดยใช้สูตรเช่นเดียวกับตารางที่ 4.4

โดยเลือกใช้สารตัวเติมที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาขั้นต้นและบดผสมกับยางเบลนด์ในปริมาณต่างๆ คือ 15, 30 และ 45 phr ทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางเบลนด์ที่ได้ เพื่อหาปริมาณของสารตัวเติมที่เหมาะสมการเบลนด์ต่อไป

4.2.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วของสกรูที่มีผลต่อการขึ้นรูปท่อยางเบลนด์ NR/XNBR

เตรียมคอมเปาวด์จากสูตรที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4.2.1 – 4.2.4 จากนั้นนำคอมเปาวด์ไปเอกซ์ทรูดผ่านเครื่อง Cold feed single-screw extruder โดยตั้งอุณหภูมิของสกรูเท่ากับ 80°C และทำการเอกซ์ทรูดท่อยางคอมเปาวด์ที่ความเร็วต่างๆ คือ 30, 40 และ 50 รอบต่อนาที และที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 80, 90 และ 100°C พร้อมทั้งวัดขนาดของท่อยางที่เอกซ์ทรูดได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมพอง (die swell, %) และสังเกตลักษณะผิวของท่อยาง NR/XNBR

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมพอง (Die swell, %)

$$\text{Die swell (\%)} = \frac{(D - D_0) \times 100}{D_0}$$

เมื่อ $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของยาง extrudate (มิลลิเมตร)

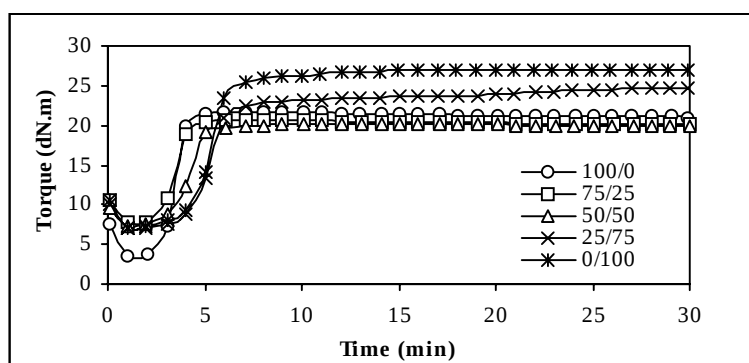
$D_0 =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของ die (มิลลิเมตร)

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

5.1 อิทธิพลของสัดส่วนเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (XNBR) ต่อสมบัติของยางเบลนด์

5.1.1 สมบัติวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

พฤติกรรมและสมบัติการวัลคาไนซ์ของคอมเปาวด์ยางเบลนด์ NR/XNBR แสดงตามรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ส่วน โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

กราฟในรูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนต่าง ๆ ใช้กำหนดเป็นสารวัดคาบไชนซ์ในระบบวัดคาบไชนซ์แบบ semi-EV และใช้สารตัวเร่งในกลุ่มไททุเรม คือ TMTD จากรูปพบว่ายาง NR (สัดส่วน 100/0 ส่วนโดยน้ำหนัก) ให้กราฟการวัดคาบไชนซ์เป็นแบบ reversion ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการวัดคาบไชนซ์เกินเวลาที่กำหนดจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลยาง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง และอาจเกิดจากการสลายพันธะซัลเฟอร์ที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Varghese et al., 1994) ซึ่งในระบบวัดคาบไชนซ์แบบ semi-EV จะให้การเชื่อมโยงแบบโมโนซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็จะมีส่วนที่เชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกซึ่งพันธะดังกล่าวมีพลังงานของพันธะต่ำไม่ทนต่อความร้อน ผลทั้งสองประการทำให้มีลักษณะกราฟการวัดคาบไชนซ์เป็นแบบ reversion ในกรณียาง XNBR (ที่สัดส่วน = 0/100 ส่วนโดยน้ำหนัก) พบว่ากราฟการวัดคาบไชนซ์เป็นแบบ marching แสดงถึงการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นตามเวลาการวัดคาบไชนซ์ ซึ่งลักษณะกราฟดังกล่าวจะบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อความร้อนดีกว่ากราฟแบบ reversion เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่า กราฟการวัดคาบไชนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 75/25 และ 50/50 ส่วนโดยน้ำหนัก จะให้กราฟแบบ reversion เนื่องจากในเบลนด์มีปริมาณยาง NR สูง แต่กราฟการวัดคาบไชนซ์ของเบลนด์ 27/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เป็นแบบ marching เพราะมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของยาง XNBR สูงกว่า แสดงว่าการให้ความร้อนที่นานขึ้นแก่เบลนด์ (NR/XNBR) 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ส่งผลให้การเชื่อมโยงเกิดได้มากขึ้นและความต้านทานต่อความร้อนดีกว่าสัดส่วนเบลนด์อื่นๆ ผลการทดสอบสมบัติวัดคาบไชนซ์ของยาง NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.1 ซึ่งได้แก่ เวลาสกอช (t_{s1}) เวลาวัดคาบไชนซ์ (t_{c90}) ค่าทอร์กต่ำสุด (M_L) และสูงสุด (M_H) และความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุด (M_H-M_L)

ตารางที่ 5.1 สมบัติวัดคาบไชนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ส่วนโดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

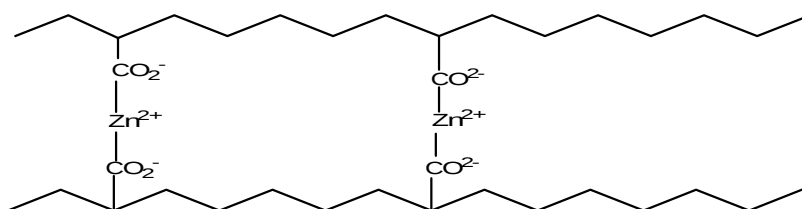
NR/XNBR (% wt/wt)	t_{s1} (min)	t_{c90} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)
100/0	2.35	4.50	3.18	21.76	18.58
75/25	2.59	4.50	7.77	20.67	13.90
50/50	2.82	5.00	7.31	20.14	12.83
25/75	3.43	8.50	6.95	24.77	17.82
0/100	3.05	7.00	7.01	27.08	20.07

เวลาสกอช คือระยะเวลาเริ่มต้นของการวัดคาบไชนซ์และบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการขึ้นรูปยาง เวลาวัดคาบไชนซ์ คือเวลาที่ใช้ในการอบยางให้สุกเพื่อให้ได้สมบัติการใช้งานที่เหมาะสม ค่าทอร์กต่ำสุดบ่งบอกถึงความหนืดของยางคอมปาวด์ ค่าทอร์กสูงสุดบ่งบอกถึงโมดูลัสหรือความแข็งของยาง สำหรับความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุดจะสัมพันธ์กับระดับการวัดคาบไชนซ์หรือระดับการเกิดพันธะเชื่อมโยง จากตารางพบว่า ยาง NR มีค่าเวลาสกอชและเวลาวัดคาบไชนซ์ต่ำกว่ายาง XNBR และยางเบลนด์ เพราะว่าในยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวทำให้

เกิดการวัลคาไนซ์แบบใช้ซัลเฟอร์ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาจาก XNBR ซึ่งมีค่าเวลาสกอชและวัลคาไนซ์ค่อนข้างสูง และสูงกว่ายาง NR เป็นเพราะว่ายาง XNBR มีส่วนที่เป็นพันธะคู่ในปริมาณที่น้อยกว่ายาง NR และมีส่วนที่เป็นหมู่กรดในโครงสร้างโมเลกุลซึ่งเป็นตัวหน่วงให้เวลาการวัลคาไนซ์เกิดช้าลง อีกทั้งซัลเฟอร์จะกระจายตัวในยาง XNBR ได้น้อยกว่ายาง NR ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ต้องใช้เวลานานขึ้นในการอบยางให้สุก เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน เบลนด์ต่างๆ พบว่า ค่าเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR และที่สัดส่วนเบลนด์ (NR/XNBR) 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก จะให้เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์นานที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนเบลนด์อื่น

เมื่อพิจารณาค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) ของยาง NR พบว่า ยาง NR มีค่า M_L (3.18 dN.m) น้อยกว่ายาง XNBR ซึ่งมีค่า M_L เท่ากับ 7.01 dN.m ค่า M_L สามารถบ่งบอกถึงความยากง่ายในการแปรรูปซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่ายาง XNBR มีความหนืดมากกว่ายาง NR และจะแปรรูปยากกว่ายาง NR และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่า ค่าทอร์คต่ำสุดจะไม่ขึ้นอยู่กัสัดส่วนเบลนด์ เมื่อพิจารณาค่าทอร์คสูงสุด (M_H) พบว่ายาง NR จะมีค่าทอร์คสูงสุดอยู่ที่ 21.76 dN.m ซึ่งจะน้อยกว่ายาง XNBR ที่มีค่า M_H เท่ากับ 27.08 dN.m และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ จะพบว่า ค่า M_H มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเบลนด์ของยาง XNBR

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด ($M_H - M_L$) พบว่า ยาง NR จะมีค่า $M_H - M_L$ เท่ากับ 18.59 dN.m ซึ่งต่ำกว่ายาง XNBR ซึ่งเท่ากับ 20.07 dN.m จากรายงานวิจัยของ Naskar และคณะ (1994) ได้อธิบายว่า ค่าทอร์คสูงสุดของยาง XNBR ที่วัลคาไนซ์ด้วย TMTD มากกว่ากรีนิชของยาง NR เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกในโครงสร้างของยาง XNBR สามารถเกิดอันตรกิริยากับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงแบบพันธะไอออนิก ซึ่งทำให้ระดับการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจจะแสดงตามรูปที่ 5.2



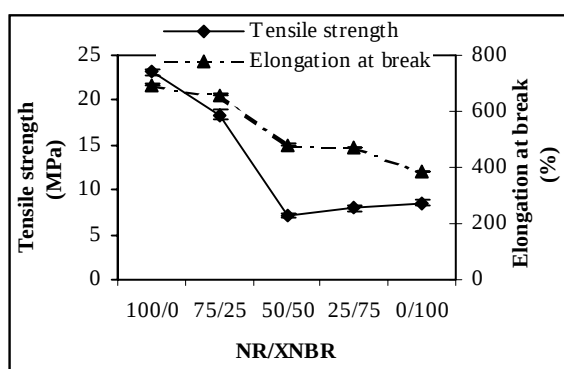
รูปที่ 5.2 พันธะเชื่อมโยงแบบไอออนิกระหว่างยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตกับซิงค์ออกไซด์

5.1.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

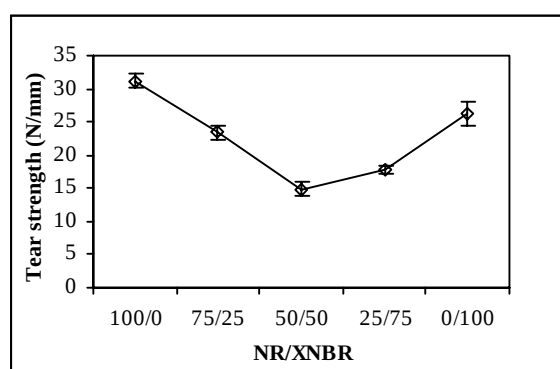
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความสามารถในการยืดขาด (elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ก่อน-หลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ แสดงตามตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ก่อน-หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบ semi-EV

NR/XNBR (% wt/wt)	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention(%)	
100/0	23.14±0.27	15.79±0.04	68.24	694.33±3.21	571.25±6.08	82.27	31.22±0.94
75/25	18.37±0.57	14.31±0.31	77.90	660.33±3.51	557.33±2.52	84.40	23.42±1.16
50/50	7.21±0.21	6.02±0.31	83.50	481.33±3.51	422.67±2.52	87.81	14.93±1.12
25/75	7.98±0.31	8.15±0.25	107.80	470.00±2.65	422.33±2.52	89.86	17.68±0.60
0/100	8.59±0.34	12.63±1.00	147.03	384.17±1.26	358.67±3.79	93.36	26.24±2.94



(a)



(b)

รูปที่ 5.3 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และ (b) ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ

จากตารางที่ 5.2 และกราฟในรูปที่ 5.3 จะพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยาง NR จะอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงและสูงกว่ายาง XNBR ถึงแม้ว่ายาง XNBR จะมีระดับการเชื่อมโยงซึ่งพิจารณาจากค่า M_H - M_L มากกว่ายาง NR ก็ตาม เนื่องจากยาง NR สามารถดกผลึกขณะดึงยืด ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อถูกดึง ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของยาง NR ส่วนยาง XNBR ไม่สามารถดกผลึกเมื่อถูกดึงยืด และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ จะพบว่า สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ จะแสดงแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณของยาง XNBR ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน จะพบว่าเบลนด์แสดงสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้หลังการบ่มแรง แต่ค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิม (%) ของยางเบลนด์ NR/XNBR (ตารางที่ 5.2) โดยเฉพาะค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิมของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดขาดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR โดยเฉพาะในกรณียาง XNBR มากกว่า 50 ส่วนโดยน้ำหนัก ค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิมของค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่า 100% ซึ่งอาจเป็นเพราะว่ายาง XNBR เกิดการเชื่อมโยงต่อได้อีกในขณะที่ถูกบ่มแรงด้วยความร้อน อันเนื่องจากยางเบลนด์มีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์แบบ Marching (รูปที่ 5.1) ดังนั้นแนวโน้มของการรักษาสมบัติ

เดิมหลังบ่มเร่งจึงสูงขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานต่อความร้อนของยางเบลนด์จะเด่นขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR

5.1.3 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.4

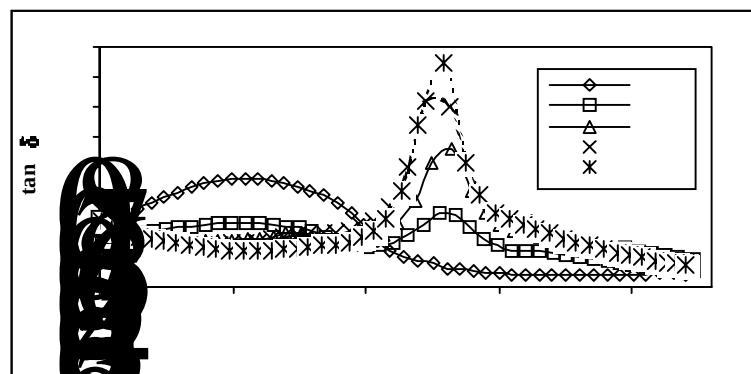


รูปที่ 5.4 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.4 จะพบว่าเมื่อปริมาณของยาง XNBR เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางเบลนด์ลดลง ซึ่งแสดงถึงความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายดีขึ้น เนื่องจากยาง XNBR เป็นยางที่มีหมู่ของอะคริโลไนไตรล์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ยาง XNBR มีความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายไม่มีสภาพขี้ผึ้งและน้ำมัน ประกอบกับยาง XNBR มีการเพิ่มหมู่กรดคาร์บอกซิลิกเข้าไปในโครงสร้างจึงทำให้ยังมีความต้านทานต่อการบวมพองมากขึ้นอีก ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก จะมีความสามารถในการต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอิน มากที่สุดเมื่อเทียบกับเบลนด์ที่สัดส่วนอื่น

5.1.4 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางเบลนด์ NR/XNBR

ผลการทดสอบยางเบลนด์ NR/XNBR ด้วยเทคนิค DMTA เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิกลาส ทรานซิชันของยางเบลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.5 และสรุปผลการทดสอบตามตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta$) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ

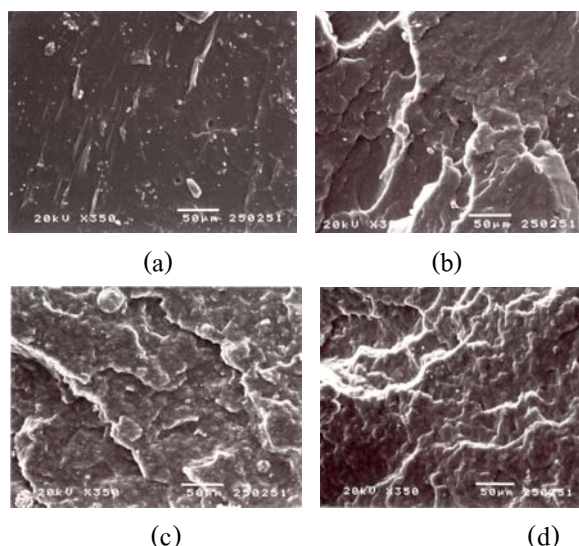
ตารางที่ 5.3 ค่า T_{g1} และ T_{g2} ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ

NR/XNBR (%)	T_{g1} (°C)	T_{g2} (°C)
100/0	-70.63	-
75/25	-64.96	8.02
50/50	-44.28	12.62
25/75	-41.54	2.37
0/100	-	9.21

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta$) กับอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ -120 ถึง 100°C ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนต่างๆ จากกราฟที่ได้จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ค่าแทนเจนต์สูญเสียมีค่าสูงสุดแสดงถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะจากคล้ายแก้วเป็นแบบยืดหยุ่นคล้ายยางหรืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) พิจารณายาง NR และยาง XNBR พบว่ามี T_g เพียงค่าเดียว คือ ที่ประมาณ -70.63 และ 9.2°C ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเบลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่ายางเบลนด์จะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิต่ำ (low glass transition temperature, T_{g1}) ซึ่งปรากฏอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง NR และที่อุณหภูมิสูง (high glass transition temperature, T_{g2}) ซึ่งจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง XNBR (ตารางที่ 5.3) แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์ประกอบไปด้วยยาง NR และยาง XNBR ที่แยกเฟสออกจากกันหรือกล่าวได้ว่า ยางเบลนด์ของยาง NR และยาง XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ มีความไม่เข้ากันเกิดขึ้น (immiscible blend) เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีสภาพขั้วที่แตกต่างกัน โดยที่ยาง NR เป็นยางที่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนล้วนๆ ในขณะที่ยาง XNBR จะมีหมู่ฟังก์ชัน $-\text{COOH}$ และหมู่อะคริโลไนไตรล์ ($-\text{CN}$) เป็นผลให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้น้อย ซึ่งจะส่งผลให้เบลนด์มีสมบัติที่ด้อยกว่าสมบัติของยางที่นำมาเบลนด์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลการทดสอบ DMTA ที่ได้สนับสนุนผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ซึ่งด้อยกว่าสมบัติเชิงกลของยาง NR และยาง XNBR

5.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของยาง NR ยาง XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 50/50 และ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก แสดงตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของ (a) ยาง NR (b) ยาง XNBR และยางเบลนด์ ระหว่างยาง NR/XNBR ที่สัดส่วน (c) 50/50 ส่วนโดยน้ำหนัก และ (d) 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก

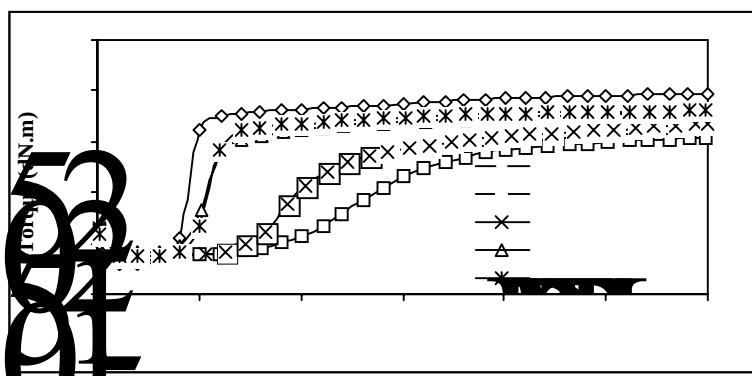
จากรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงถึงผิวรอยแตกหักของยาง NR ยาง XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR จะพบว่า ยาง NR (รูปที่ 5.6 (a)) และยาง XNBR (รูปที่ 5.6 (b)) จะมีผิวรอยแตกที่ค่อนข้างเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 50/50 และ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก จะแสดงผิวรอยหักที่หยาบและไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะสังเกตเห็นการกระจายของอนุภาคยางบนผิวของยางเบลนด์ได้จากรูปที่ 5.6 (c) และ (d) ตามลำดับ ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าในการผสมยาง NR และยาง XNBR มีความไม่เข้ากันเกิดขึ้นและผลการทดลองที่ได้สนับสนุนการแยกเฟสของยาง NR และยาง XNBR ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA

ดังนั้นจากผลการศึกษาสัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ของยาง NR/XNBR ต่อสมบัติของยางเบลนด์ พบว่า ยางเบลนด์มีเวลาสกอสและเวลาวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ XNBR ค่าทอร์คต่ำสุดจะไม่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนเบลนด์ แต่ค่าทอร์คสูงสุดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยาง XNBR ที่เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลงตามปริมาณของยาง XNBR สมบัติความต้านทานต่อการบ่มเร่งและความต้านทานต่อการบวมพองจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของยาง XNBR และจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA และ SEM แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์ NR/XNBR มีความไม่เข้ากันเกิดขึ้น ดังนั้นจากผลการศึกษาที่ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ยางเบลนด์ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งมีสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความต้านทานต่อความร้อนและการบวมพองในตัวทำละลายไม่มีข้อด้อยที่สุด

5.2 อิทธิพลของสารตัวเร่งชนิดต่างๆ และปริมาณซึ่งค่อออกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลด NR/XNBR

5.2.1 สมบัติวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก แสดงตามรูปที่ 5.7 และตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.7 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลด NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

ตารางที่ 5.4 สมบัติวัลคาไนซ์ของยางเบลด NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลด 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

Accelerator	T _{S1} (min)	T _{C90} (min)	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)
TMTD	3.53	9.50	2.86	19.69	16.83
CBS	6.85	20.00	3.41	16.71	13.30
MBTS	8.14	23.50	3.64	15.34	11.70
CBS+TMTD	4.27	12.00	4.06	17.85	13.79
MBTS+TMTD	4.04	9.00	3.65	18.06	14.41
CBS+TMTD +ZnO 10 phr	2.38	5.24	4.26	20.65	17.41

รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลด NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ในระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV ตามที่ให้รายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.2 จากรูปพบว่าสารตัวเร่งทุกตัวจะให้ลักษณะกราฟการวัลคาไนซ์ของยางเบลด NR/XNBR เป็นแบบ marching ซึ่งแสดงว่า ยางเบลดสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เพิ่มขึ้นเมื่อให้เวลาการทดสอบนานขึ้นซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงและสมบัติของ

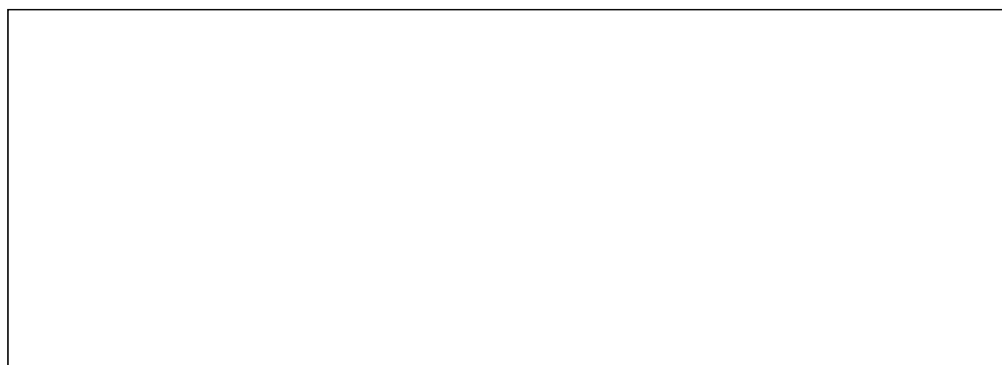
ยางเบลนด์ ผลการวิเคราะห์สมบัติการวัลคาไนซ์ซึ่งแสดงตามตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ หากพิจารณาการใช้สารตัวเร่งเดี่ยว 3 ชนิด ปริมาณ 1.5 phr ร่วมกับ ZnO phr ซึ่งสารตัวเร่งเดี่ยว 3 ชนิดที่ใช้เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไทูเรม (TMTD) ไธอาโซล (MBTS) และซัลฟิनाไมด์ (CBS) จากผลการทดลองพบว่า TMTD จะให้เวลาสกอกซ์และเวลาการวัลคาไนซ์สั้นกว่าสารตัวเร่ง CBS และ MBTS เพราะว่า TMTD เป็นสารตัวเร่งที่เร็วและไวมากต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงในการวัลคาไนซ์ยาง นอกจากนี้ยังเป็นสารใช้ในการวัลคาไนซ์โดยสามารถให้กำมะถัน (sulfur donor) สำหรับสารตัวเร่ง CBS และ MBTS เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวให้สารเมอร์แคปโตเบนโซไธอาโซล (Mercapto benzothiazole, MBT) และนอกจากนี้ CBS จะให้เบสออกมาด้วย ซึ่งระยะเวลาก่อนที่จะแตกตัวออกมานี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า delayed action (พรพรรณ, 2528) ทำให้มีความปลอดภัยและช่วยให้ยางสามารถไหลได้ดีไม่เกิดสกอกซ์ หรือที่เรียกว่า “ยางตาย” ก่อนที่จะไหลเต็มเบ้า แต่เนื่องจากในระดับอุตสาหกรรมการใช้ TMTD ให้เวลาสกอกซ์ที่เร็วมาก ทำให้ง่ายไม่สามารถไหลได้ทัน ยางจะไหลได้ไม่เต็มเบ้า ขณะที่สารตัวเร่ง CBS และ MBTS เป็นสารที่มีเวลาวัลคาไนซ์ยาวจึงไม่เหมาะที่จะใช้เดี่ยวๆ เพราะจะทำให้เกิดสิ้นเปลืองเวลาและพลังงาน ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำสารตัวเร่ง TMTD ไปใช้เป็นส่วนตัวเร่งรองร่วมกับสารตัวเร่งหลัก คือ CBS และ MBTS โดยปรับปริมาณของสารตัวเร่งหลักและร่วม ให้เท่ากับ 1.5 phr และพบว่าเวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ หรืออัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ในกรณีที่ใช้สารตัวเร่งร่วมกันเกิดได้เร็วขึ้นกว่าการใช้ CBS และ MBTS เดี่ยวๆ ซึ่งเดิมเวลาวัลคาไนซ์ของเบลนด์ที่ใช้ CBS และ MBTS มีค่าประมาณ 20.00 และ 23.50 นาที จะลดลงเหลือ 12.00 และ 9.00 นาที ตามลำดับ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้สารตัวเร่งร่วมสองชนิดจะช่วยเสริมประสิทธิภาพกัน แต่เนื่องจากยาง XNBR มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถวัลคาไนซ์ด้วยโลหะออกไซด์ได้อย่างรวดเร็ว และจากผลการทดลองเบื้องต้นโดยการแปรชนิดของสารตัวเร่ง สามารถระบุได้ว่าระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้ CBS (1.0 phr) + TMTD (0.5 phr) + ZnO (5 phr) ร่วมกันมีประสิทธิภาพดี มีความปลอดภัยในการแปรรูป ให้ระดับการเชื่อมโยงที่สูง แต่เวลาวัลคาไนซ์ยังคงค่อนข้างนาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 phr ต่อสมบัติวัลคาไนซ์ ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.4 การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 10 phr จะให้สมบัติวัลคาไนซ์โดยเฉพาะเวลาวัลคาไนซ์ลดลงจาก 12 นาที เป็น 5 นาที นอกจากนี้ยังเพิ่ม ค่า M_L , M_H และ $M_H - M_L$ ของเบลนด์

5.2.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

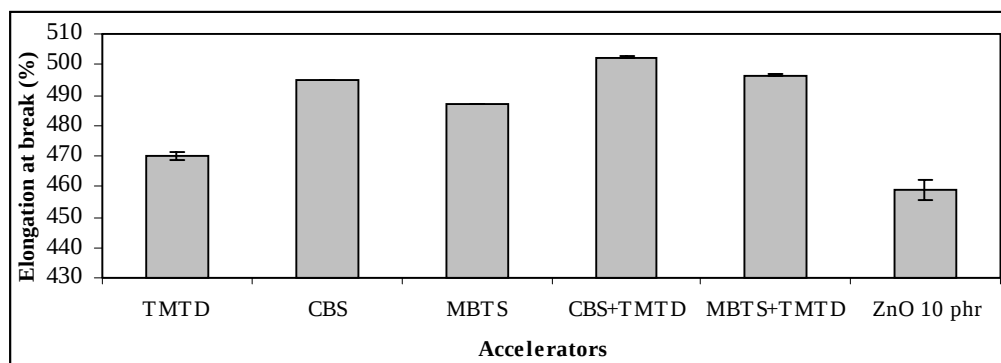
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ แสดงตามตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8-5.10

ตารางที่ 5.5 สมบัติเชิงกลของยางเบลด NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลด 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้สารตัวเร่งต่างๆ ก่อน-หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

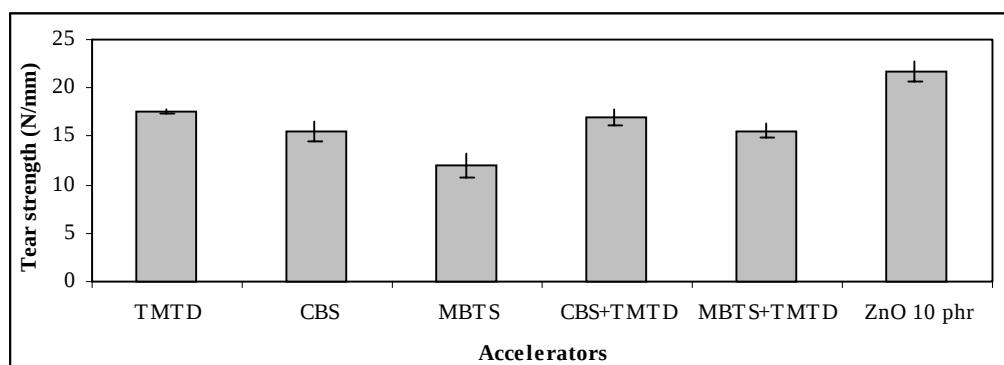
Accelerators	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
TMTD	7.98±0.31	7.58±1.17	94.99	470.00±2.65	436.00±1.41	92.77	17.51±0.16
CBS	6.62±0.15	5.40±0.13	81.57	495.00±1.41	423.50±3.54	85.56	15.44±1.00
MBTS	5.98±0.01	4.46±0.12	74.58	487.00±4.24	406.00±2.83	83.37	11.92±1.24
CBS+TMTD	7.44±0.28	6.38±0.21	85.75	502.33±2.08	439.00±1.41	87.39	16.98±0.79
MBTS+TMTD	6.46±0.33	4.20±0.22	65.02	496.50±4.95	440.67±6.03	88.76	15.58±0.70
CBS+TMTD +ZnO 10 phr	14.17±0.70	14.90±1.70	105.15	458.67±3.21	388.80±6.22	84.77	21.77±1.04



รูปที่ 5.8 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางเบลด NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลด 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ และเพิ่ม ZnO เป็น 10 phr



รูปที่ 5.9 ความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ และเพิ่ม ZnO เป็น 10 phr



รูปที่ 5.10 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ และเพิ่ม ZnO เป็น 10 phr

จากตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8 – 5.10 ซึ่งแสดงผลการใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สารตัวเร่ง TMTD เดี่ยวๆ ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเบลนด์มากกว่าการใช้ CBS และ MBTS เนื่องจากว่าสารตัวเร่งชนิดนี้สามารถให้กำมะถันได้ 2 อะตอม ในขณะที่ CBS และ MBTS สามารถให้กำมะถันเพียง 1 อะตอม จึงทำให้ยางเบลนด์มีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่าสารตัวเร่งอื่นที่ใช้ ซึ่งผลการทดลองนี้พบว่าสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า M_n-M_L (ตารางที่ 5.4) แต่ระยะยืดจนขาดมีค่าต่ำกว่าเพราะยางเบลนด์แข็งแรงขึ้นทำให้ความยืดหยุ่นลดลง เมื่อพิจารณาผลการใช้สารตัวเร่งร่วม คือ CBS+TMTD และ MBTS+TMTD พบว่าสมบัติเชิงกลของเบลนด์ดีกว่าการใช้ CBS และ MBTS เดี่ยวๆ เพราะ TMTD จะทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มมากขึ้นและให้ความยืดหยุ่นดีขึ้น

พิจารณาความต้านทานต่อการบ่มเร่งและค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิม (Retention, %) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ตามตารางที่ 5.5 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดขาดของยางเบลนด์ที่ใช้สารตัวเร่ง TMTD มีการรักษาสถิตเดิมหรือความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเร่ง CBS และ MBTS แต่อย่างไรก็ตามเบลนด์ที่ใช้สารตัวเร่งร่วม CBS+TMTD และ MBTS+TMTD จะมีแนวโน้มในการต้านทานต่อการบ่มเร่งดีกว่า CBS และ MBTS เนื่องจาก TMTD จะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการบ่มเร่งของ CBS และ MBTS ให้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในเบลนด์ที่ใช้ CBS+TMTD เป็นสารตัวเร่งร่วม พบว่า เบลนด์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ แต่ความสามารถในการยืดขาดของเบลนด์จะลดลง ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของซิงค์ออกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์และเป็นสารวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ โดยซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในยาง XNBR เกิดเกลือคาร์บอกซิเลต ซึ่งจะเชื่อมโยงโมเลกุลยางเชิงกายภาพผ่านพันธะไอออนิก ($\text{COO}^- \text{--} \text{Zn}^{2+} \text{--} \text{OOC}$) และเสริมความแข็งแรงให้แก่ยางเบลนด์ NR/XNBR

ดังนั้นจากการศึกษาหาชนิดสารตัวเร่งที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สารตัวเร่งร่วม CBS+TMTD+ZnO 10 phr จะให้สมบัติวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม สมบัติเชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งเพิ่มขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดี ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ CBS+TMTD เป็นสารตัวเร่งและใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 phr

5.3 อิทธิพลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติและความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ NR/XNBR

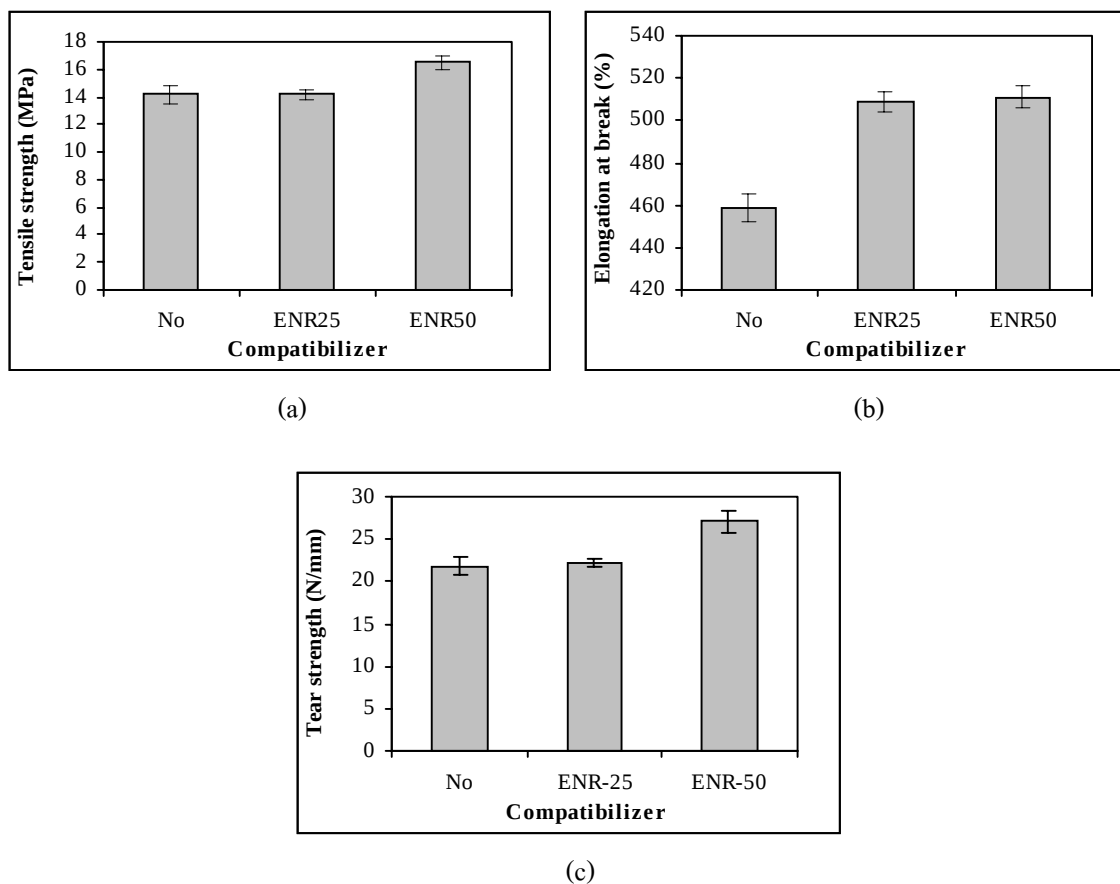
5.3.1 ศึกษาชนิดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Epoxyprrene®25 และ Epoxyprrene®50) ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

5.3.1.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ใช้ Epoxyprrene®25 และ Epoxyprrene®50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงตามตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.11

ตารางที่ 5.6 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprrene®25 และEpoxyprrene®50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr ก่อน-หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Compatibilizer	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
No	14.17±0.17	12.95±0.45	91.39	458.67±3.21	358.66±1.77	78.20	21.77±1.04
ENR-25	14.20±0.34	13.63±1.40	95.99	508.67±4.52	410.00±6.93	80.60	22.18±0.50
ENR-50	16.49±0.48	16.36±1.36	99.21	511.00±2.65	404.33±5.13	79.13	27.08±1.22



รูปที่ 5.11 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันและใช้ Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr

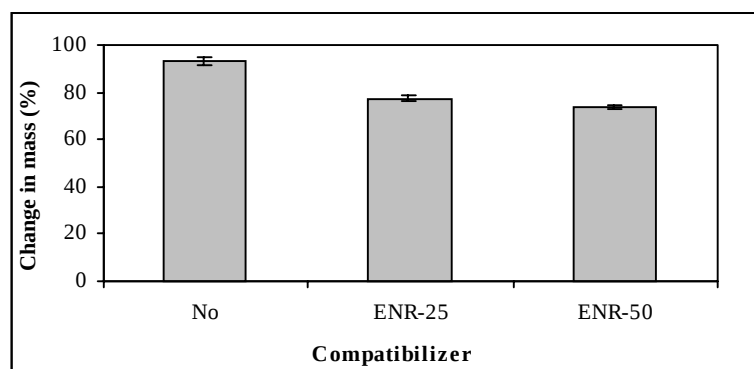
ตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.11 แสดงสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR สามชนิด คือ เบลนด์ที่ไม่ผสมสารเพิ่มความเข้ากัน เบลนด์ที่ผสมด้วยสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใส่ Epoxyprene® 25 ลงไปในเบลนด์ ไม่ส่งผลให้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ยกเว้นความสามารถในการยืดขาดเพิ่มขึ้นประมาณ 11% แต่การใส่ Epoxyprene® 50 มีแนวโน้มเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดประมาณ 16% 11% และ 24% ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกล อธิบายได้ว่าเกิดจากการยึดติดระหว่างเฟสดีขึ้น (adhesion at interface) (Barlow and Paul, 1984) หมู่ฟังก์ชันในสารเพิ่มความเข้ากันได้ สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับหมู่กรด (-COOH) ของยาง XNBR (Ramesh and DE, 1993) และในขณะเดียวกันยาง Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50 ก็จะมีส่วนของยางธรรมชาติในโครงสร้างทำให้เข้ากันได้กับยาง NR ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่างเฟสจึงมากขึ้น ยางเข้ากันได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการใช้ยาง

Epoxyprene[®] 25 และ Epoxyprene[®] 50 พบว่า สมบัติเชิงกลของเบลนด์ที่ใช้ยาง Epoxyprene[®] 50 จะเด่นกว่ากรณีเบลนด์ที่ใช้ Epoxyprene[®] 25 เนื่องจากจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มากกว่า

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ NR/XNBR ทั้งสามชนิด จากตารางที่ 5.6 พบว่า ภายหลังการบ่มแรง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดขาดลดลง เพราะในขณะบ่มแรงด้วยความร้อน การสลายพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางเบลนด์ การเชื่อมโยงใหม่ของโมเลกุลยาง และการตัดโซ่โมเลกุลยางอาจจะเกิดขึ้นได้ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลจะสอดคล้องกับการทดลองของ Naskar *et al.*, (2002) ที่กล่าวว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเกิดจากการสลายพันธะของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนด์ เนื่องจากความร้อนและนอกจากนี้ยังทำให้ความยืดหยุ่นของเบลนด์ลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การรักษาสถิติเดิมของยาง เบลนด์ต่างๆ จะเห็นได้ชัดเจนว่าเบลนด์ที่ผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีเปอร์เซ็นต์การรักษาสถิติเดิมดีกว่าเบลนด์ที่ไม่ผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้และแนวโน้มความสามารถในการต้านทานต่อการบ่มแรงขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่ฟังก์ชันในสารเพิ่มความเข้ากันได้ ผลการทดลองนี้ พบว่าคล้ายกับผลรายงานวิจัยของ Tanrattanakul and Petchkeaw (2005) ที่ได้กล่าวว่าการใช้ยาง Epoxyprene เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในเบลนด์ของยางธรรมชาติและคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอททีลีน (CSM) จะปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อความร้อนในยางเบลนด์ให้ดีขึ้น

5.3.1.2 ความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ชนิดต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.12

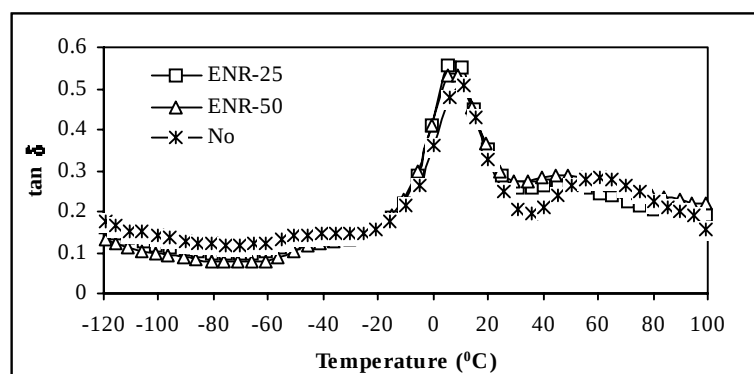


รูปที่ 5.12 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprene[®] 25 และ Epoxyprene[®] 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

รูปที่ 5.12 แสดงความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR จากรูป พบว่าการใส่ Epoxyprene[®] 25 และ Epoxyprene[®] 50 จะทำให้เบลนด์มีความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายดีขึ้น และขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่ฟังก์ชันในตัวประสาน เนื่องจากกระบวนการติดประสานที่ดีขึ้นระหว่างเฟสยาง NR และ ยาง XNBR

5.3.1.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเบลนด์ยาง NR/XNBR

ผลการทดสอบยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ด้วยเทคนิค DMTA เพื่อวิเคราะห์ผลการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเบลนด์ แสดงตามรูปที่ 5.13 และตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta$) และอุณหภูมิของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprrene[®] 25 และ Epoxyprrene[®] 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr

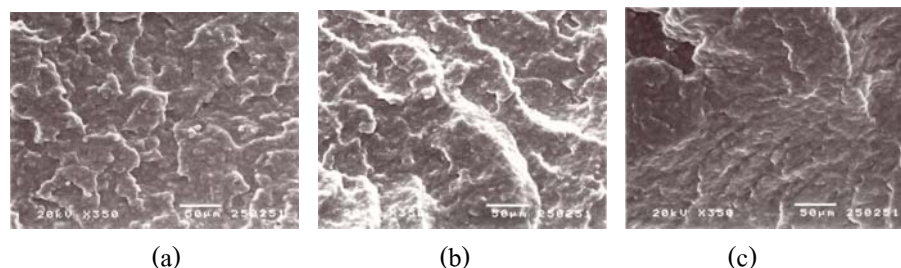
ตารางที่ 5.7 ค่า T_{g1} และ T_{g2} ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprrene[®] 25 และ Epoxyprrene[®] 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr

Compatibilizer	T_{g1} (°C)	T_{g2} (°C)
No	-48.12	10.74
Epoxyprrene [®] 25	-45.95	7.57
Epoxyprrene [®] 50	-45.22	6.58

จากรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงอิทธิพลของการใช้ยาง Epoxyprrene[®] 25 และ Epoxyprrene[®] 50 ต่อกราฟแทนเจนต์สูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR พบว่า การใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันปรากฏขึ้น 2 ค่า เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่กรณีที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ นั้น พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเฟสยาง XNBR (T_{g2}) ในเบลนด์เลื่อนไปยังอุณหภูมิที่ต่ำลง (ตารางที่ 5.7) ซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสยาง NR และ XNBR Lopattananon et al. (2007) ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของเบลนด์ NR/CSM โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ และกล่าวรายงานว่าเบลนด์มีความไม่เข้ากัน โดยยางเบลนด์จะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง NR (ประมาณ -65°C) และยาง CSM (ประมาณ -7 °C) แต่การเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสยาง NR และ CSM จากการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทำให้เกิดการเลื่อนของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเฟสยาง CSM ไปยังอุณหภูมิที่ลดต่ำลง

5.3.1.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ชนิดต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR (a) ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (b) ใส่ยาง Epoxyprene® 25 ปริมาณ 0.5 phr และ (c) ใส่ยาง Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr ที่กำลังขยาย 350 เท่า

จากรูปที่ 5.14 เปรียบเทียบลักษณะผิวรอยแตกของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ก่อนและหลังผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้ Epoxyprene® 50 พบว่า ผิวรอยหักของเบลนด์ก่อนผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีลักษณะหยาบ ขรุขระ ไม่เรียบ แต่ผิวรอยแตกหักจะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หลังจากใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีขึ้นของยางเบลนด์ และการใช้ยาง Epoxyprene® 50 จะให้ลักษณะผิวรอยแตกที่เรียบกว่าการใช้ Epoxyprene® 25 จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA

จากผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้ Epoxyprene® 25 และ ยาง Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในยาง NR/XNBR ได้แสดงให้เห็นว่ายาง Epoxyprene® 50 มีประสิทธิภาพในการเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ยาง Epoxyprene® 50 ในการศึกษาขั้นต่อไป

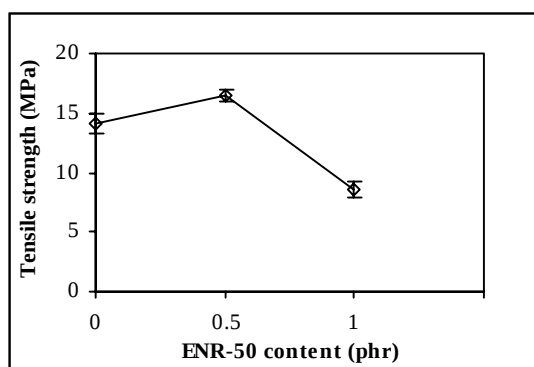
5.3.2 ศึกษาปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ Epoxyprene® 50 ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก

5.3.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

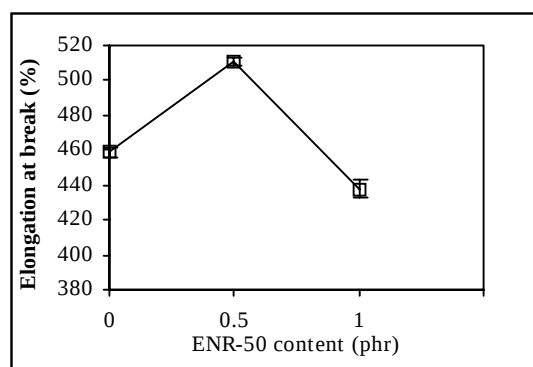
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene® 50 ซึ่งแปรปริมาณยาง Epoxyprene® 50 แสดงตามตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.15

ตารางที่ 5.9 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ใช้ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่างๆ ก่อน-หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

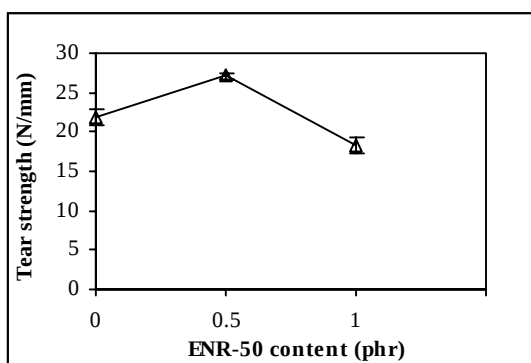
ENR-50 content (phr)	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
0	14.17±0.17	12.95±0.45	91.39	458.67±3.21	358.66±1.77	78.20	21.77±1.04
0.5	16.49±0.48	16.36±1.36	99.21	511.00±2.65	404.33±5.13	79.13	27.08±1.22
1	8.50±1.61	8.34±1.61	98.12	437.67±5.13	319.33±5.51	72.96	18.27±0.96



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.15 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และ (c) ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ใช้ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณต่างๆ

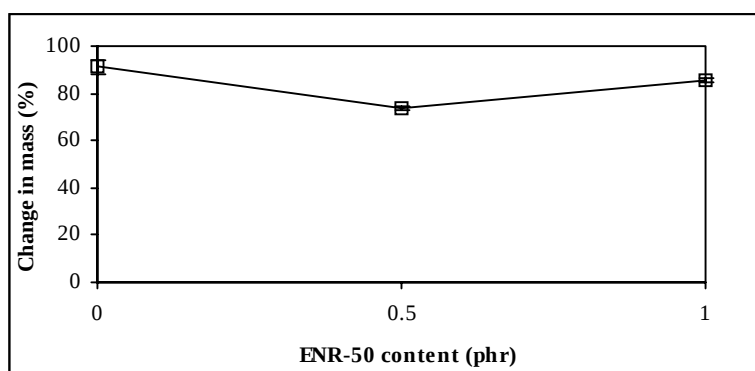
จากตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.15 แสดงสมบัติเชิงกลก่อนการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene® 50 พบว่า การใช้ยาง Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr จะทำให้

สมบัติเชิงกลมากกว่ากรณีของเบลนด์ที่ไม่มีใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ และเมื่อพิจารณาการใส่ยาง Epoxyprene® 50 ในปริมาณที่มากขึ้น (1.0 phr) พบว่าสมบัติดังกล่าวจะมีค่าลดลงและมีค่าน้อยกว่ากรณีเบลนด์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงว่าการใช้ยาง Epoxyprene® 50 ในปริมาณที่มากขึ้น Epoxyprene® 50 จะไม่เป็นทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติบ่มแรงของเบลนด์ (ตารางที่ 5.9) พบว่าสมบัติบ่มแรงของเบลนด์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ 0.5 phr จะดีกว่า เบลนด์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และเบลนด์ที่เติม Epoxyprene® 50 ในปริมาณ 1.0 phr

5.3.2.2 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการศึกษาความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่แปรปริมาณการใส่ Epoxyprene® 50 ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ใช้ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในปริมาณต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีนด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วน โดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่าการเติม Epoxyprene® 50 ในปริมาณ 0.5 และ 1.0 phr จะลดเปอร์เซ็นต์การบวมพองของเบลนด์ในตัวทำละลาย เนื่องจาก Epoxyprene® 50 เพิ่มการติดประสานระหว่างเฟสดีซี (adhesion at interface) ทำให้เบลนด์เข้ากันได้เพิ่มขึ้น และทนต่อการละลาย แต่ระดับการบวมพองขึ้นอยู่กับปริมาณของ Epoxyprene® 50 กล่าวคือ การใส่ Epoxyprene® 50 ปริมาณมากกว่า 0.5 phr จะทำให้ความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายลดลง

จากการศึกษาผลของปริมาณของ Epoxyprene® 50 ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วน โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณที่เหมาะสมในการเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ 0.5 phr ดังนั้นจึงเลือกใช้ Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr เพื่อเตรียมเบลนด์ในขั้นตอนศึกษาต่อไป

5.4 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

5.4.1 ศึกษาชนิดของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

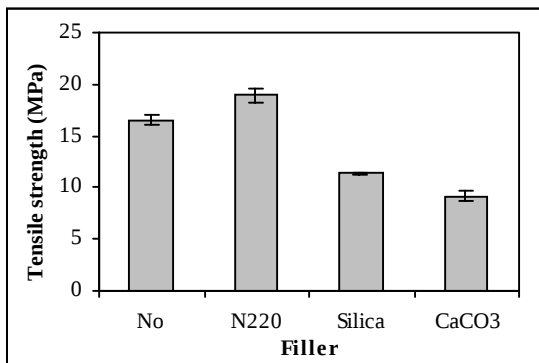
5.4.1.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 แสดงตามตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.17

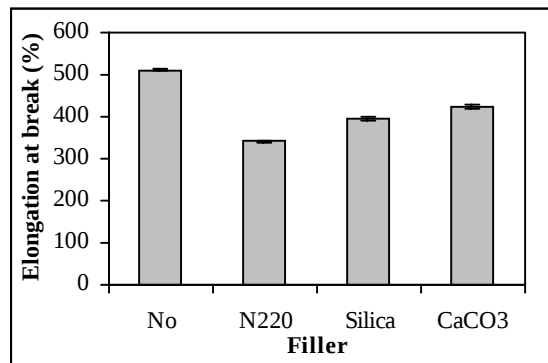
ตารางที่ 5.10 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+Epoxyprene[®] 50 ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ปริมาณ 30 phr ก่อน-หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Filler	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
No	16.49±0.48	16.36±1.36	99.21	511.00±2.65	404.33±5.51	79.12	27.08±0.34
N220	18.90±0.06	19.02±0.63	100.63	341.33±3.21	236.25±6.40	69.21	39.60±1.60
Silica	11.39±0.11	12.54±0.30	110.10	395.67±3.51	293.67±3.21	74.22	30.91±1.54
CaCO ₃	9.35±0.05	9.98±0.94	109.07	423.33±4.16	325.25±3.85	76.83	19.93±0.86

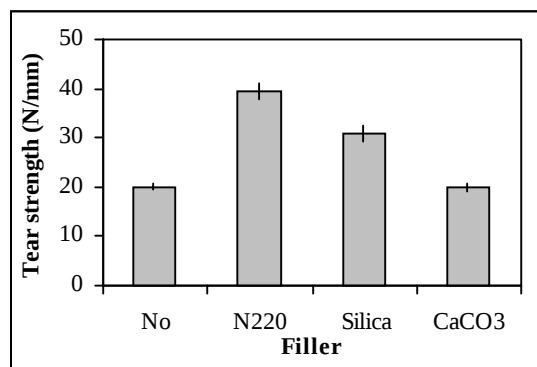
จากตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.17 แสดงผลการใช้สารตัวเติมต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 พบว่าการใส่สารตัวเติมทุกชนิดลดความสามารถในการยืดขาดของยางเบลนด์ เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมต่างๆ จะเห็นว่าเขม่าดำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดดีกว่ากรณีไม่ใส่สารตัวเติม และดีกว่ากรณีใช้ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากการกระจายที่สม่ำเสมอซึ่งพิจารณาได้จากภาพถ่าย SEM ของผิวรอยแตกหักของยางเบลนด์ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ (รูปที่ 5.19) เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนจากตารางที่ 5.10 พบว่าการใส่สารตัวเติมเพิ่มความสามารถในการรักษาสมบัติเดิมของความต้านทานต่อแรงดึง แต่ลดความสามารถในการรักษาสมบัติความสามารถในการยืดขาด



(a)



(b)

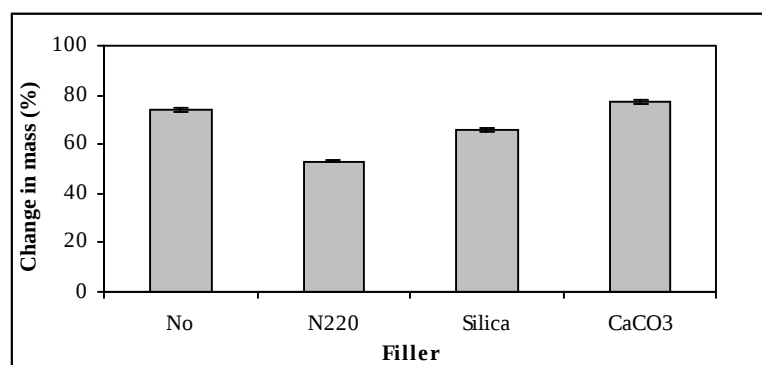


(c)

รูปที่ 5.17 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ความสามารถในการยืดขาดและ (c) ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ปริมาณ 30 phr

5.4.1.2 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการใช้สารตัวเติมต่อความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

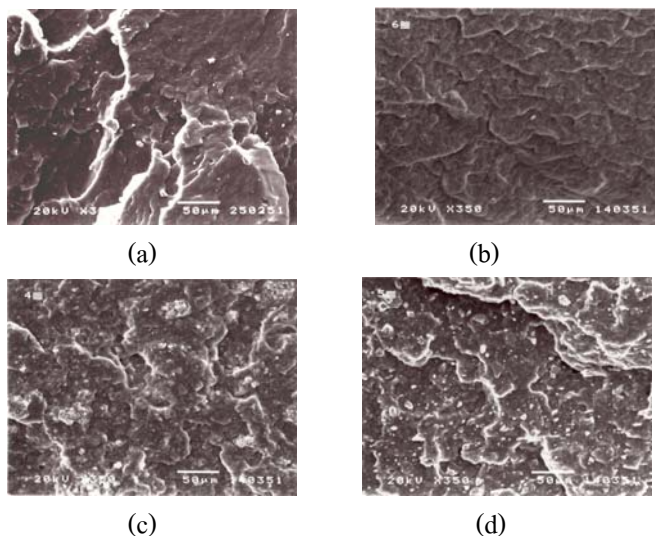
จากรูปที่ 5.18 แสดงความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอิน การใส่เขม่าดำและซิลิกาปริมาณ 30 phr เพิ่มความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการบวมพองของเบลนด์ จะสังเกตว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังนี้ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต <ไม่ใส่สารตัวเติม<ซิลิกา<เขม่าดำ ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับระดับการกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (รูปที่ 5.19)

5.4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลการใช้สารตัวเติมต่างๆ ต่อสัณฐานวิทยาผิวรอยแตกของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 แสดงตามรูปที่ 5.19

จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของยางเบลนด์ต่างๆ ตามรูปที่ 5.19 พบว่า การใส่สารตัวเติมเขม่าดำเกรด N220 (รูปที่ 5.19(b)) จะให้ผิวรอยแตกที่ละเอียด แสดงให้เห็นถึงการกระจายที่สม่ำเสมอของอนุภาคเขม่าดำ แต่เมื่อพิจารณาการใส่สารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต (รูปที่ 5.19(c)-(d)) พบว่าผิวรอยแตกมีความหยาบ ขรุขระกว่ากรณีใส่เขม่าดำ และจะสังเกตเห็นว่าการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารตัวเติมทั้งสองชนิดในยางเบลนด์ ซึ่งมีลักษณะการเกาะกันเป็นกลุ่ม (aggregate) ก่อตัวเป็นอนุภาคใหญ่มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สนับสนุนสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์

จากผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ คือ เขม่าดำ (N220) ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แสดงให้เห็นว่า การใช้สารตัวเติมเขม่าดำเกรด N220 จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกสารตัวเติมชนิดนี้ในการศึกษาต่อไป

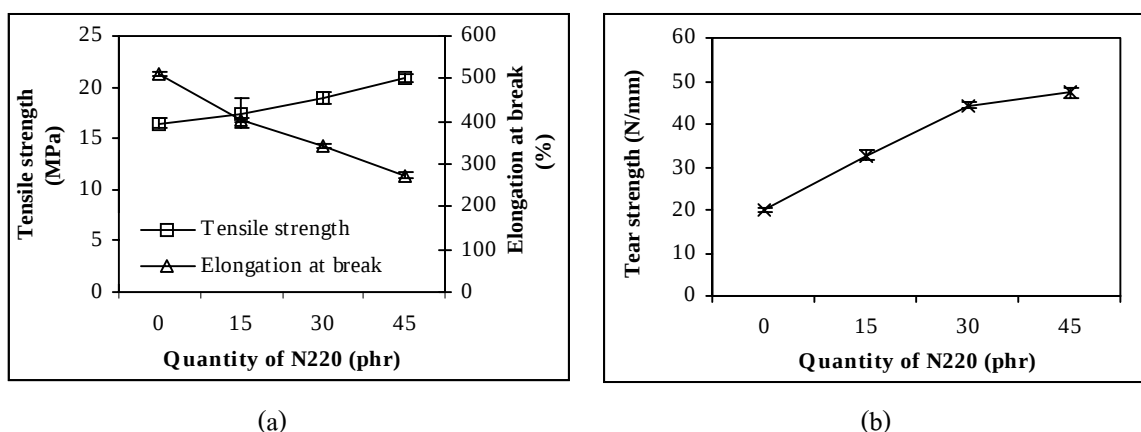


รูปที่ 5.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 (a) ไม่ใส่สารตัวเติม (b) ใส่เขม่าดำ (N220) (c) ซิลิกา และ (d) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) โดยกำหนดปริมาณสารตัวเติม 30 phr (กำลังขยาย 350 เท่า)

5.4.2 ศึกษาปริมาณของเขม่าดำเกรด N220 ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

5.4.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลของปริมาณเขม่าดำเกรด N220 ต่อสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+Epoxyprene[®] 50 แสดงตามตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.20

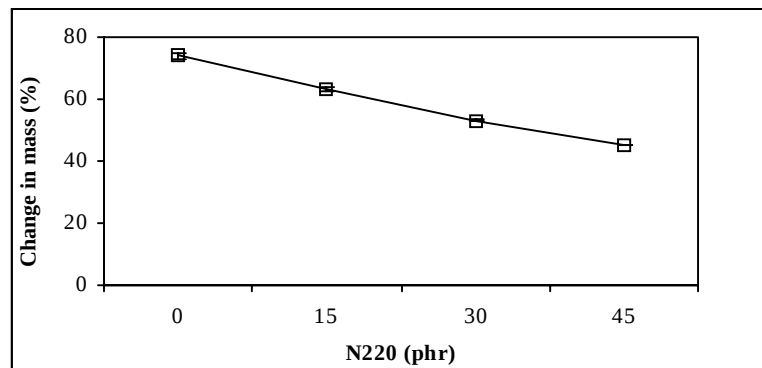


รูปที่ 5.20 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และ (b) ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 ใช้สารตัวเติมเขม่าดำ เกรด N220 ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 5.20 แสดงสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 ที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำ ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้น จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำสามารถกระจายตัวได้ในยางเบลนด์และอาจเกิดอันตรกิริยาได้กับเฟสยางเบลนด์ได้มากขึ้น แต่การใส่สารตัวเติมเพิ่มขึ้นจะลดสมบัติความเป็นยางซึ่งสังเกตได้จากความสามารถในการยืดขาดที่ลดลงตามปริมาณของเขม่าดำ

5.4.2.2 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลของปริมาณเขม่าดำ เกรด N220 ต่อความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene[®] 50 แสดงตามรูปที่ 5.21



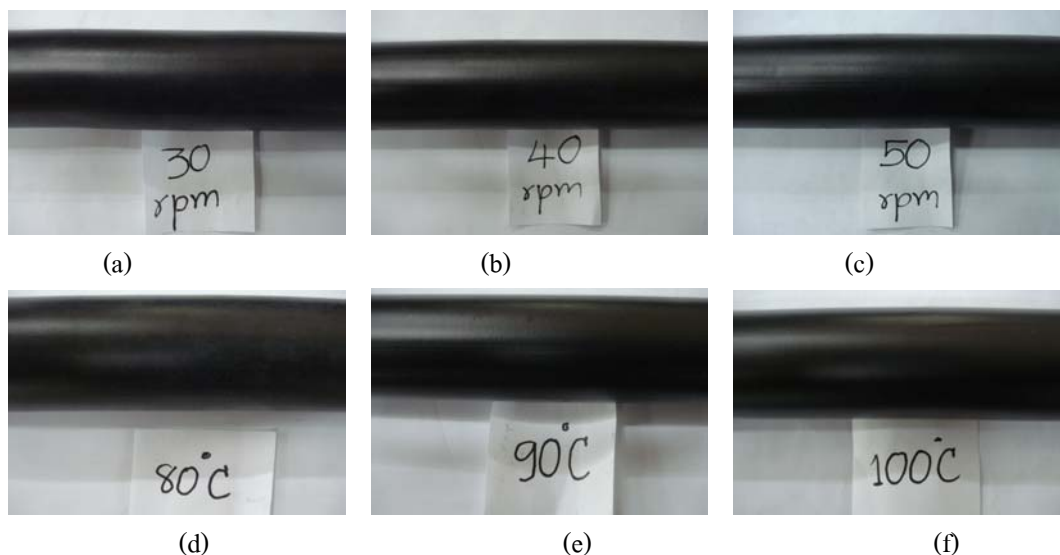
รูปที่ 5.21 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+Epoxyprrene® 50 ใช้สารตัวเติมเขม่าดำเกรด N220 ปริมาณต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีนด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 5.21 แสดงให้เห็นผลของปริมาณเขม่าดำเกรด N220 ต่อความสามารถในการต้านทานตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีน ซึ่งพบว่าความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายจะดีขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ เพราะแรงดึงดูดระหว่างยางและเขม่าดำเกิดได้มากตามปริมาณเขม่าดำ ทำให้สามารถต้านทานต่อทำละลายดีขึ้นและขึ้นอยู่กับปริมาณเขม่าดำ

จากผลการศึกษาปริมาณของเขม่าดำ เกรด N220 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ทำให้สมบัติเชิงกลของยางเบลดเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง และตัวทำละลายดีขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนเบลด ระบบวัลคาไนซ์สารเพิ่มความเข้ากันได้ และสารตัวเติม ผู้วิจัยจึงเลือกเบลด NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV ซึ่งใช้ CBS+TMTD+ZnO 10 phr ใช้ Epoxyprrene® 50 ปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของระบบนี้ และเสริมประสิทธิภาพด้วยเขม่าดำเกรด N220 ปริมาณ 30 phr พบว่ามีสมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายไม่มีสภาพขั้วอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังนั้นในการเตรียมวัสดุเบลดเพื่อศึกษาการผลิตเพื่อทนความร้อนและน้ำมันในการศึกษาขั้นต่อไป จึงเลือกใช้สภาวะข้างต้นในการเตรียมเพื่อทนความร้อนและน้ำมัน

5.5 อิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของสกรูที่มีผลต่อการขึ้นรูปท่อยางเบลด NR/XNBR

ผลการศึกษาความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิในการเอกทรีตซ์ท่อยางเบลด NR/XNBR ต่อเปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์และลักษณะผิวของท่อ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อยางเบลด NR/XNBR โดยใช้สูตรยางเบลดที่เหมาะสมจากการศึกษาตามขั้นตอนต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.22 และตามตารางที่ 5.11



รูปที่ 5.22 ลักษณะทางกายภาพของฟิวทอย่างเบลนด์ NR/XNBR ที่เอ็กซ์ทรูดด้วยความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบเย็น (cold feed extruder) (a) 30 rpm, 80°C (b) 40 rpm, 80°C และ (c) 50 rpm, 80°C (d) 80°C, 40 rpm (e) 90°C, 40 rpm และ (f) 100°C, 40 rpm

ตารางที่ 5.11 เปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์ (Die swell, %) ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่เอ็กซ์ทรูดด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบเย็น ที่ตั้งความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที) และอุณหภูมิต่างๆ

Rate (rpm)	Die swell (%)		
	Temperature (°C)		
	80	90	100
30	27.04	-	-
40	27.55	28.57	29.08
50	28.57	-	-

จากตารางที่ 5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์ (die swell, %) ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR หลังผ่านการเอ็กซ์ทรูดที่ความเร็วและอุณหภูมิต่างๆ จะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 80°C โดยตั้งความเร็วรอบให้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์ของเบลนด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการที่ยางเบลนด์อยู่ภายในสกรูที่มีความเร็วรอบหรืออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น โมเลกุลยางจะมีการจัดเรียงตัวตามแนวแรงได้ดีขึ้น เมื่อยางไหลออกจากคายน์ โมเลกุลยางก็จะพยายามหดตัวกลับคืนรูป ดังนั้นการบวมพองของยางเบลนด์หลังออกจากคายน์จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบสกรู แต่อย่างไรก็ตามการบวมพองคายน์ที่ทดสอบได้จากการแปรความเร็วรอบสกรู 3 ค่า ให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในทำนองเดียวกันการบวมพองคายน์ของยางเบลนด์ที่เอ็กซ์ทรูดด้วยความเร็วรอบเท่ากัน (40 rpm) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นไปเร่งให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาตรอิสระในเนื้อยางมากขึ้น และไปลดโอกาสของการเกี่ยวพัน (entanglement) ของโซ่โมเลกุล อีกทั้งยังลดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยาง (intermolecular interaction) จึงทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวอย่างอิสระได้ง่าย

ขึ้น และเรียงตัวเป็นระเบียบตามแนวเดียวกับทิศทางของแรงที่ได้รับมากขึ้นในขณะไหลผ่านหัวดาย หลังจากที่ยาง เบลนด์ได้ถูกดันให้ออกมาผ่านหัวดาย (die) ก็จะพยายามคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการบวมพองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างชัดเจนของเปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางเบลนด์ที่เอ็กซ์ทรูดผ่านอุณหภูมิต่างๆ ในงานวิจัยนี้ และเมื่อพิจารณาผิวของท่อยางเบลนด์ (รูปที่ 5.22) ที่เอ็กซ์ทรูดผ่านดายโดยตั้งความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิต่างๆ พบว่า ผิวของท่อยางเบลนด์จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ ผิวเรียบเป็นมัน

ดังนั้นจากผลการทดลองตั้งแต่การเตรียมยางเบลนด์เพื่อผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมันโดยแปรปัจจัยและเงื่อนไขต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต คือ ใช้สัดส่วนเบลนด์ NR/XNBR 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้สารตัวเร่ง CBS+TMTD+ZnO 10 phr ใช้ Epoxyprene® 50 ในปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ และใช้เคมีดำเกรด N220 ปริมาณ 30 phr ในการเตรียมวัสดุเบลนด์ และควรเอ็กซ์ทรูดท่อยางด้วยความเร็วรอบสกรู 40 rpm ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อประหยัดเวลาและพลังงานในการผลิตท่อจากยางเบลนด์ NR/XNBR

6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมยางทนความร้อนและน้ำมันจากการเบลนด์ยางธรรมชาติ (NR) และยางไนไตรล์คาร์บอออกซิเลต (XNBR) โดยศึกษาปัจจัยการเตรียมยางเบลนด์ ดังต่อไปนี้ คือ อัตราส่วนการเบลนด์ อิทธิพลของสารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ การใช้ Epoxyprene® 25 และ ® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายของยางเบลนด์ การผสมยาง NR และ XNBR ในปริมาณ 25 และ 75 ส่วนโดยน้ำหนัก ให้ยางซึ่งมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างต่ำ แต่ยังมีสามารถในการทนความร้อนและตัวทำละลายดีที่สุดเมื่อเทียบกับยางเบลนด์ที่สัดส่วนอื่น การใช้สารตัวเร่ง CBS (1.0 phr)+TMTD (0.5 phr) ร่วมกับ ZnO 10 phr ในระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กัมมะถันชนิด Semi-EV สามารถปรับปรุงสมบัติวัลคาไนซ์และเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ให้ดีขึ้น เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ Epoxyprene® 25 และ Epoxyprene® 50 ในยางเบลนด์ส่งผลให้เกิดการเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างเฟสยาง NR และ XNBR ทำให้ความต้านทานต่อความร้อนและการบวมพองในตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้นอีก และพบว่าสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมในระบบเบลนด์นี้ คือ การใช้ Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr ซึ่งได้ให้สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์เพิ่มขึ้นประมาณ 11-22 % เมื่อเปรียบเทียบผลการเติมสารตัวเติมเคมีดำ เกรด N220 และซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า เหมดำเสริมสมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายของยางเบลนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าสารตัวเติมอีกสองชนิด นอกจากนี้การใส่เคมีดำในปริมาณ 30 phr ให้ยางเบลนด์ซึ่งมีสมบัติเชิงกล ทนต่อความร้อนและตัวทำละลายดีที่สุดสำหรับการเบลนด์ ดังนั้นสูตรยางเบลนด์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางทนความร้อนและน้ำมันหรือตัวทำละลาย โดยมีความต้านทานต่อความร้อนในระดับที่ไม่แตกต่างจากยางไนไตรล์คาร์บอออกซิเลตมากนักและสามารถต้านทานต่อตัวทำละลายได้ดีกว่ายางไนไตรล์คาร์บอออกซิเลต อีกทั้ง

มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม คือ การใช้อัตราส่วนเบลนด์ NR/XNBR = 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้สารตัวเร่ง CBS (1.0 phr)+TMTD (0.5 phr) ร่วมกับ ZnO 10 phr ในระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถันชนิด Semi-EV ใช้ Epoxyprene® 50 ปริมาณเพียง 0.5 phr และควรใช้เขม่าดำปริมาณ 30 phr เป็นสารตัวเติม เมื่อนำสูตรยางเบลนด์ที่เหมาะสมนี้ไปเตรียมยางเบลนด์โดยการบดผสมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และเอกซ์ทรูดท่อยางซึ่งคาดว่าจะมีความทนความร้อนและตัวทำละลายหรือน้ำมันได้ระดับหนึ่งที่ใกล้เคียงกับยางเบลนด์ที่เตรียมได้ในการศึกษาเบื้องต้น ผลการเอกซ์ทรูดท่อยางที่อุณหภูมิ (80, 90 และ 100°C) และความเร็วรอบของสกรูต่างๆ (30, 40 และ 50 rpm) ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว พบว่าท่อยางมีผิวเรียบ สม่ำเสมอ ในขณะที่ร้อยละของการบวมพองคายของยางเบลนด์ภายหลังการเอกซ์ทรูดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิและความเร็วรอบสกรู ดังนั้นการเอกซ์ทรูดท่อยางเบลนด์ด้วยเงื่อนไขการเบลนด์ที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ด้วยความเร็วรอบสกรู 40 rpm ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือ 80°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตท่อยางทนความร้อนและน้ำมัน เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่สามารถประหยัดเวลาและพลังงานในการผลิต

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ศึกษาการเบลนด์ของยาง 3 ชนิดร่วมกัน คือ ยาง NR ยาง XNBR และยาง ENR เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทนน้ำมันและความร้อนที่เสริมจากการใช้ยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุล คือยาง ENR ร่วมในสูตรยางเบลนด์

6.2.2 ศึกษาวิจัยเพิ่มเติมและหาวิธีการพัฒนาการผลิตท่อยางจากยางเบลนด์ NR/XNBR ที่ลดต้นทุน และมีศักยภาพในเชิงพาณิชย์

7 เอกสารอ้างอิง

จันทร์สมร มะเอียด. สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของยางเบลนด์ของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตโดยใช้ไอโอโนเมอร์เป็นตัวประสาน.วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2550.
พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง.ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528.

Alex, R., De, P. P. and De, S. K. Self-vulcanizable ternary rubber blend based on epoxidized natural rubber, carboxylated nitrile rubber and polychloroprene rubber : 2 Effect of blend ratio and fillers on properties. *Polymer*, 1991, 32, 2546.

Bonner, J. G. and Hope, P. S. Chapter 3-Compatibilization and Reactive Blending In Polymer Blends and Alloys Folkes, M.J. and Hope, P.S. (eds). Blackie Academic and Professional, London, 1993.

Barlow, J. W and Paul, D. R. Mechanical Compatibilization of Immiscible Blends. *Polym. Eng. Sci.*, 1984, 24, 525.

Chakraborty, S. K., Bhowmick, A. K. and DE, S. K. Structure-Property Relation of Carboxylated Nitrile Rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1981, 26, 4011.

- Chakraborty, S. K. and De, S. K. Effect of curing systems on polymer-filler interaction, technical properties and fracture mode of carboxylated nitrile rubber. *Polymer*, 1983, 24, 1055.
- Ibarra, L. The effect of crosslinking type on the physical properties of carboxylated acrylonitrile butadiene elastomer. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1999, 73, 927.
- Ibarra, L. and Alzoriz, M. Vulcanization of carboxylated nitrile rubber (XNBR) by a mixed zinc peroxide-sulphur system. *Polym. Inter.*, 2000, 49, 115.
- Lopattananon, N., Boonsong, K and Seadan, M. Effect of Zinc Salts of Sulfonated Natural Rubbers on Mechanical Properties, Morphology and Compatibility of Natural Rubber/Chlorosulfonated Polyethylene Blends. *Inter. Polym. Proc.*, 2007, XXII, 359.
- Naskar, N., Bismas, T. and Basu, D. K. Polymer Blend: A Novel Method for the Preparation of a Natural Rubber-Carboxylated Nitrile Rubber Blend. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1994, 52, 1007.
- Naskar, N., Debnath, S. C. and Basu, D. K. Novel Method for the Preparation of Carboxylated Nitrile Rubber-Natural Rubber Blends Using Bis(diisopropyl)Thiophosphoryl Polysulfides. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 80, 1725.
- Naskar, N., Debnath, S. C. and Basu, D. K. Effect of Thiophosphoryl Compounds as Accelerators and Coupling Agents on the Vulcanization of NR-XNBR Blend. *J. Appl. Polym. Sci.*, 86, 3286.
- Ramesh, P. and DE, S. K. Carboxylated Nitrile Rubber as a Reactive Compatibilizer for Immiscible Blends of Poly(vinyl chloride) and Epoxidized Natural Rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1993, 50, 1369.
- Tanrattanakul, V. and Petchkaew. A. Mechanical Properties and Blend Compatibility of Natural Rubber-Chlorosulfonated Polyethylene Blend. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2006, 99, 127.
- Varghese, S. and Kuriakose, B. Short sisal fibre reinforced natural rubber composites: high-energy radiation, thermal and ozone degradation. *Polym. Degrad. Stab.*, 1994, 44, 55.

