



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

สมบัติการวัดคาบอินซ์และสมบัติทางกายภาพของยางเบลด
ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางคลอโรซัลโฟเนต-
พอลิเอทีลีน

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีชน แกสมาน และคณะ

สิงหาคม 2549

สัญญาเลขที่ RDG4950025

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมบัติการวัดคาบและสมบัติทางกายภาพของยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์
และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

คณะผู้วิจัย	สังกัด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีวัน แกสมาน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
นางสาวปณิยา สาและ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. เจริญ นาคะสรรค์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการ วิจัยแห่งชาติยางพารา (SPR)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
หน้าสรุปโครงการ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	2
ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา	3
แนวทางการดำเนินงานวิจัย	3
บทสรุปของผู้บริหาร	4
1. วิธีการทดลอง	
1.1 การเตรียมยางธรรมชาติโอพอกไซค์	6
1.2 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน กับยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติโอพอกไซค์ต่างๆ	7
1.3 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ระหว่าง ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนกับ ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติโอพอกไซค์	7
1.4 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการเบลนด์	8
1.5 การศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์โมลโอพอกไซค์	9
1.6 การศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม	9
1.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ	10
1.8 การวิเคราะห์และการทดสอบ	11
2. ผลการทดลองและวิจารณ์	
2.1 สมบัติของยางธรรมชาติโอพอกไซค์	19
2.2 สมบัติทางรีโอโลยีของยางเบลนด์	20
2.3 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์	26
2.3.1 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์	26
2.3.2 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติทางกายภาพ	31
2.4 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์	38
2.4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์ต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์	38
2.4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์ต่อสมบัติทางกายภาพ	41
2.5 อิทธิพลของปริมาณหมู่โอพอกไซค์	52
2.5.1 อิทธิพลของปริมาณหมู่โอพอกไซค์ ต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์	52
2.5.2 อิทธิพลของปริมาณหมู่โอพอกไซค์ต่อสมบัติทางกายภาพ	55
2.6 อิทธิพลของสารตัวเติม	65

2.6.1 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์ของยางเบลมอนด์	65
2.6.2 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพ	69
3. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
3.1 สรุปผลการทดลอง	81
3.2 ข้อเสนอแนะการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	83
4. เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	85

สมบัติการวัดค่าไนซ์และสมบัติทางกายภาพของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติพอกไซค์ และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

บทคัดย่อ

เตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์ให้มีปริมาณหนือพอกไซค์เท่ากับ 10,20,30,40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล นำยางธรรมชาติพอกไซค์ 30 เปอร์เซ็นต์โมล มาเบลนด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเบลนด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ศึกษาผลของระบบการวัดค่าไนซ์ต่อสมบัติทางกายภาพ คือ ระบบกำมะถัน ระบบซิงค์ออกไซด์ ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ ระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบผสม (แมกนีเซียมออกไซด์+เปอร์ออกไซด์) และระบบเรซิน พบว่า ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ ให้สมบัติทางด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความทนทานต่อตัวทำละลายสูงที่สุด การศึกษาอัตราส่วนการเบลนด์ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ที่สัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 % โดยน้ำหนัก พบว่า สมบัติทางด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความทนทานต่อตัวทำละลายมีค่าสูงขึ้นเมื่อมียางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมากขึ้น การศึกษาปริมาณของหนือพอกไซค์ต่อสมบัติทางกายภาพ โดยแปรเปอร์เซ็นต์โมลพอกไซค์ดังนี้คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล โดยเบลนด์ที่อัตราส่วน 50/50 และ 75/25 % โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติทางด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความทนทานต่อตัวทำละลายมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณหนือพอกไซค์ การศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำต่อสมบัติทางกายภาพ (แปรปริมาณ 0, 20, 40, และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) พบว่า สมบัติทางด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความทนทานต่อตัวทำละลายมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองชนิดมากขึ้น

Vulcanization and Physical Properties of Epoxidized Natural Rubber and Chlorosulphonated Polyethylene Blends

Abstract

Epoxidized natural rubber with various levels of epoxide groups at 10, 20, 30, 40 and 50 mol% (ENR-10, ENR-20, ENR-30, ENR-40 and ENR-50) were prepared. The ENRs were blended with chlorosulfonated polyethylene (CSM). NR/CSM blend was also prepared for a comparison purpose. Influence of vulcanization systems on physical properties was also studied. These include sulfur, ZnO (red seal ZnO), MgO, peroxide, mixed (MgO + peroxide) and resin vulcanization systems. It was found that tensile strength, elongation at break, tear resistance, hardness and swelling resistance of the MgO system were the highest. Various blend ratios of ENR-30/CSM and NR/CSM were prepared. We found that physical properties in terms of tensile strength, elongation at break, tear resistance, hardness and swelling resistance increased with increasing levels of CSM. We also found that those properties increased with the increase levels of epoxidize groups in the ENR molecules. Various quantities of silica and carbon black (i.e., at a loading level of 0, 20, 40 and 60 phr) were used in a compounding formulation. The tensile strength, elongation at break, tear resistance, hardness and swelling resistance were observed to increase with the increase levels of fillers.

หน้าสรุปโครงการ

1. ชื่อโครงการ สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

คำสำคัญ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์, ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน, ไฮพาลอน สมบัติการวัลคาไนซ์, สมบัติทางกายภาพ

Research title Vulcanization and Physical Properties of Epoxidized Natural Rubber and Chlorosulphonated Polyethylene Blends

keywords Epoxidized Natural rubber, Chlorosulphonated Polyethylene, Hypalon, Curing Properties, Physical Properties

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัสชิน แกสมาน

หน่วยงาน ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1866 / 0-7333-1099

E-mail kazizon@bunga.pn.psu.ac.th

3. นักศึกษาหรือนักวิจัย หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ชื่อ - สกุล นางสาวปานิยา สาและ

หน่วยงาน ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1866 / 0-7333-1099

E-mail s4545022@mor-or.pn.psu.ac.th

4. หน่วยงาน ชื่อและสถานที่ติดต่อของผู้บังคับบัญชาของหน่วยงานของหัวหน้าโครงการ

ชื่อ - สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมปอง ทองผ่อง

หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1800 / 0-7333-1099

E-mail tsompong@bunga.pn.psu.ac.th

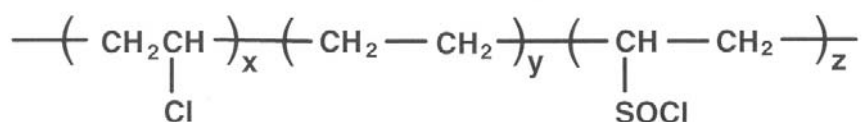
5. ได้เสนอโครงการนี้ หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งอื่นที่ใดบ้าง

☐ ไม่เสนอต่อแหล่งทุนอื่น

6. ระยะเวลาดำเนินงาน 6 เดือน

7. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลเป็น cis-1,4-polyisoprene มีการจัดเรียงตัวที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดตกผลึกได้เมื่อยืดออก ทำให้มีความแข็งแรงโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ แต่โมเลกุลที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลไม่มีขั้ว ไม่ทนต่อสภาวะสภาวะใช้งานที่มีตัวทำละลายหรือน้ำมัน นอกจากนี้ยังไม่ทนต่อความร้อนเช่นเดียวกัน การนำยางธรรมชาติมาเบลนด์กับยางชนิดต่างๆที่ทนต่อน้ำมันได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย เช่น Wootthikanokkhan and Tunjongnawin, 2003 ได้ศึกษาอิทธิพลของการผสมต่อการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยงและสมบัติด้านการดึงของยางธรรมชาติผสมกับยางอะคริลิก (Acrylic rubber) Sirisinha, *et al.*, 2004 ได้ศึกษาสมบัติการทนน้ำมันและสมบัติหลังบ่มเร่งของยางธรรมชาติผสมยางคลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) โดยใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ EPDM-g-MA Phewthongin, *et al.*, 2004 ได้ศึกษาในยางชนิดเดียวกัน (NR/CPE) โดยศึกษาสมบัติด้านการไหลของยางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เป็นต้น แต่การเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางดังกล่าวข้างต้นมีความแตกต่างด้านความเข้ากันได้ เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์การละลายที่แตกต่างกัน (Solubility parameter) รวมทั้งความแตกต่างทางด้านความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์โดยเฉพาะความแข็งแรงของยางด้อยลงไป แนวทางหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ดังกล่าวคือ การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilising agent) นอกจากนี้ยังมีแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือ การปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติให้มีความเป็นขั้วโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปในโมเลกุลยางธรรมชาติ ได้มีการศึกษาการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในการเบลนด์เช่นเดียวกัน Manoj, *et al.*, 1994 ได้ศึกษาการเกิดการเชื่อมโยงเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นได้เอง (Self-crosslinkable) ของ Zinc-sulfonated EPDM/ENR ส่วนการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เช่น Roychoudhury, *et al.*, 1993 ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยาง ENR/CSM โดยใช้เครื่อง FTIR และ NMR Koklas *et al.*, 1991 ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของการเบลนด์ระหว่าง CPE/PVC/ENR โดยทดสอบสมบัติเชิงพลวัตและการดึง นอกจากนี้ Mukhopadhyay, *et al.*, 1991 ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ดังกล่าว โดยในการวิจัยนี้จะใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโมเลกุลยางธรรมชาติในสภาวะน้ำยางด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดฟอร์มิค ได้โมเลกุลยางธรรมชาติที่มีหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide ring) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโมเลกุลของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนดังรูปข้างล่าง จะเห็นว่าหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และหมู่คลอรีน (Chlorine atom) หรือคลอโรซัลโฟเนต สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ได้ แรงกระทำที่เกิดขึ้นคาดว่าจะทำให้ยางทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้และส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน



โครงสร้างโมเลกุลของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

8. วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติพอกไซค์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน
- เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติพอกไซค์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน
- เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติพอกไซค์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

9. ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา

งานวิจัยนี้จะเตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์จากน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดฟอร์มิคที่อุณหภูมิ 50°C โดยเตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีโมลพอกไซค์ต่างๆ (0 - 50 โมลเปอร์เซ็นต์) จากนั้นนำยางธรรมชาติพอกไซค์มาเบลนดกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติพอกไซค์กับคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เช่น ระบบการวัลคาไนซ์ อัตราส่วนการเบลนด ปริมาณหม้อพอกไซค์ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม เป็นต้น จากนั้นนำยางคอมเพาต์ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ การทนต่อตัวทำละลาย และสมบัติเชิงความร้อน เพื่อประเมินผลความเข้ากันได้ของยางทั้งสองชนิด

10. ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Output)

- ทราบถึงความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติพอกไซค์กับคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน
- เพื่อได้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพของยางเบลนด
- เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการออกสูตรยางที่ต้องการสมบัติด้านต่างๆ โดยเฉพาะการทนน้ำมันจากการเบลนดยางธรรมชาติพอกไซค์กับคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

11. แนวทางการดำเนินงานวิจัย

สมมุติฐานการวิจัย	วิธีการวิจัย
• การปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน	• เตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์จากน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน
	• ผสมยางธรรมชาติพอกไซค์กับคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน โดยแปรปัจจัยต่างๆ คือ ระบบการวัลคาไนซ์ อัตราส่วนการเบลนด ปริมาณหม้อพอกไซค์ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม เป็นต้น
	• ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ การทนต่อตัวทำละลาย และสมบัติเชิงความร้อน ของยางเบลนดที่ได้จากการแปรปัจจัยต่างๆข้างต้น
	• วิเคราะห์ผล จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

บทสรุปของผู้บริหาร (Executive Summary)

การปรับปรุงโครงสร้างยางธรรมชาติให้เกิดอนุพันธ์ของยางธรรมชาติที่มีสมบัติบางประการดีขึ้น ทำให้เพิ่มโอกาสที่จะแข่งขันกับยางสังเคราะห์ที่ใช้งานเฉพาะด้านได้ เช่น การดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ทำให้ง่ายธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อน้ำมัน (Swelling resistance) และการต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซ (Permeability) เพื่อเสริมสมบัติบางประการให้เด่นมากยิ่งขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ง่ายชนิดนี้มีความเป็นขี้ผึ้ง สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับวัสดุหรือผิวของวัสดุที่มีความเป็นขี้ผึ้ง โดยมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไปประยุกต์ใช้ทางด้านสารยึดติด (Adhesives) ในงานติดวัสดุต่างๆ เช่น ไม้ โลหะ เป็นต้น การนำไปเบลนดกับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อใช้เป็นยางที่ทนน้ำมันที่ไม่มีขี้ผึ้ง การใช้เป็นเฟสอีลาสโตเมอร์ในการเบลนดกับพลาสติกพอลิโพรไพลีนหรือพอลิเอทิลีน เพื่อเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ต้องการสมบัติเด่นด้านการทนต่อน้ำมัน ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (Chlorosulfonated polyethylene, CSM หรือ Hypalon®) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีการใช้งานที่ต้องการสมบัติเด่นด้านการทนต่อน้ำมัน ทนความร้อน และมีความทนทานต่อการสึกหรอสูง แต่อย่างดังกล่าวมีราคาค่อนข้างแพง การนำยางชนิดนี้มาเบลนดกับยางที่มีราคาถูกลงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาต่ำลงได้ และยังคงรักษาสมบัติเด่นต่างๆไว้ได้ ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีหมู่ฟังก์ชันคลอโรซัลโฟเนตซึ่งมีความเป็นขี้ผึ้ง ในขณะที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีหมู่อีพอกไซด์ซึ่งมีความเป็นขี้ผึ้งเช่นกัน โดยที่หมู่ฟังก์ชันทั้งสองคาดว่าจะสามารถเกิดแรงกระทำทางเคมีหรือพันธะทางเคมีระหว่างกันได้

จากการศึกษาความเข้ากันได้ของยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน พบว่า การเบลนดระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของยางแต่ละชนิดได้ ส่วนการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนไม่ปรากฏแรงกระทำทางเคมีดังกล่าว เมื่อศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ พบว่า การใช้ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ ($MgO + DPTT$) พบว่า ให้ลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพของยางเบลนดที่ดีกว่าระบบกำมะถันชนิดอีวี ($TMTD + TBBS + S$) ระบบเปอร์ออกไซด์ ($DCP + TAC$) ระบบเรซิน ($SP-1045 + SnCl_2$) ระบบผสม ($MgO + DCP + TAC$) ระบบซิงค์ออกไซด์ ($ZnO + DPTT$) เมื่อนำระบบการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมดังกล่าวมาศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด พบว่า ทั้งกรณีของยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน และยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน พบว่า การเพิ่มปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ทำให้ค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งแรง และความต้านทานต่อตัวทำละลายดีขึ้น ในขณะที่ระยะยืดสูงสุดมีค่าลดลง การศึกษาอิทธิพลของปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน และยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบผสม ($MgO + DCP + TAC$) พบว่า การเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็งแรงมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากกว่า 30 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่า สมบัติดังกล่าวข้างต้นเพิ่มสูงขึ้น ส่วนสมบัติด้านระยะยืดสูงสุดจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 10 โมลเปอร์เซ็นต์ และเมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์สูงกว่นั้น สมบัติดังกล่าวกลับมีค่าเพิ่มขึ้น

ความต้านทานต่อตัวทำลายของยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นหรือเกิดการบวมพองลดลง เมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซค์เพิ่มมากขึ้น โดยที่ยางเบลนค์ที่ใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์มีความต้านทานต่อการบวมพองมากกว่ากับยางธรรมชาติ การศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม โดยในการวิจัยนี้ใช้สารตัวเติม 2 ชนิดคือ ซิลิกา และเขม่าดำ พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ทำให้ค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งแรง และความต้านทานต่อตัวทำลายมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะยืดสูงสุดมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำ พบว่า การใช้สารตัวเติมเขม่าดำมีค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกา ในขณะที่ระยะยืดสูงสุด พบว่า การใช้สารตัวเติมซิลิกามีค่าสูงกว่ายางเบลนค์ที่ใช้เขม่าดำ ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกัน ความทนทานต่อตัวทำลาย พบว่า การใช้เขม่าดำมีความทนทานต่อตัวทำลายมากกว่าการใช้ซิลิกาเล็กน้อย

จากผลการวิจัย ทำให้ทราบว่า การเบลนค์ยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดแรงกระทำทางเคมีและพันธะทางเคมีระหว่างยางทั้งสองได้ ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนค์มีสมบัติเด่นทางด้านความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อความร้อน และความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำลายมีขี้ผึ้ง โดยที่ ทำให้ต้นทุนในการทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเดี่ยวๆ ลดลงได้ โดยการเบลนค์กับยางธรรมชาติพอกไซค์ นอกจากนี้ยังทำให้เพิ่มขอบเขตของการใช้ยางธรรมชาติที่ปรับสภาพของโมเลกุล

1. วิธีการทดลอง

1.1 การเตรียมยางธรรมชาติฟอกไซค์

นำน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (ผลิตโดยบริษัท ยะลาตาเท็กซ์ จำกัด ประเทศไทย) มาเจือจางให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ เติมน้ำ Teric N 30 ซึ่งเป็นสารเคมีลดแรงตึงผิวประเภทนอนไอออนิก (non-ionic surfactant) จัดอยู่ในกลุ่ม Alkylphenol Ethoxylate ผลิตโดยบริษัท Huntsman Co., Ltd. ประเทศออสเตรเลีย เพื่อให้มีน้ำยางมีความเสถียร กวนของผสมเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50°C หลังจากนั้นเติมกรดฟอร์มิกอย่างช้า ๆ แล้วเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นลำดับสุดท้าย สูตรที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติฟอกไซค์แสดงดังตารางที่ 1 ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปตามเวลาที่กำหนด แล้วจับตัวด้วยเมทานอล นำไปรีดเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยเครื่องรีดแผ่นยาง แล้วนำไปล้างน้ำให้สะอาดเพื่อกำจัดสารเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกไป นำแผ่นยางไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติฟอกไซค์

ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติฟอกไซค์

สารเคมี	น้ำหนักเปียก (กรัม)
60% HA Latex	192.67
50% Hydrogen peroxide	176.88
94% Formic acid	44.04
30% Teric N30	18.00

1.2 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางเบลนค์ระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนกับยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์ต่างๆ

1.2.1 ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี

ทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของยางเบลนค์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี (Capillary Extrusion Rheometer) ที่อุณหภูมิ 160°C โดยเตรียมยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติพอกไซค์หรือยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นผึ่งแห้ง (ผลิตโดยสหกรณ์ยางบ้านควนปิ่นแด่ จ.พัทลุง ประเทศไทย) กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (มีชื่อทางการค้าคือ Hypalon® เกรด H-40 ผลิตโดย บริษัท Dupont Dow Elastomers Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณของคลอรีน $34.5 \pm 1.5\%$ กำมะถัน $1.0 \pm 0.12\%$ และมีค่า ML(1+4) 100°C เท่ากับ 51-61) โดยแปรอัตราส่วนต่างๆของยางเบลนค์ดังนี้คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 โดยน้ำหนัก

1.3 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางเบลนค์ระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนกับยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์

1.3.1 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

นำยางดิบมาบด (Mastication) เพื่อปรับความหนืดของยาง 2 ชนิด (โดยยางธรรมชาติบดที่อุณหภูมิห้องด้วยลูกกลิ้งเป็นเวลา 6 นาที ส่วนยางธรรมชาติพอกไซค์ใช้เวลาบด 3 นาที ที่สภาวะเดียวกัน ได้ความหนืด ML (1+4) $125^{\circ}\text{C} = 39$ เท่ากับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่ผ่านลูกกลิ้ง 1 ครั้ง) จากนั้นเตรียมยางคอมเพาต์ของยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ที่อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก โดยผสมยางและสารเคมีบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งโดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ตามสูตรดังตารางที่ 2 โดยใช้ลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว รีดยางออกเป็นแผ่น ตั้งยางคอมเพาต์ที่อุณหภูมิห้องไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำยางคอมเพาต์ไปหาลักษณะการวัลคาไนซ์ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบหมุน (ODR รุ่น 100S) โดยใช้อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 160°C จากนั้นนำยางคอมเพาต์ไปอัดเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง Compression molding ตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ทดสอบได้

1.3.2 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติทางกายภาพ

นำยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก และแปรระบบการวัลคาไนซ์ มาทดสอบสมบัติทางกายภาพตามวิธีการในหัวข้อ 1.8.5 – 1.8.8

ตารางที่ 2 สูตรที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางเบลนด์

ระบบการวัลคาไนซ์	สารเคมี	ปริมาณ (phr)	เวลาในการผสม (นาที)
Sulfur	Rubber blends	100	1
	ZnO	5	1
	Stearic acid	2	1
	TBBS	2.4	1
	TMTD	0.5	1
	Sulfur	0.75	2
ZnO (read seal)	Rubber blends	100	1
	ZnO (red seal)	12.5	3
	DPTT	1.25	2
MgO	Rubber blends	100	1
	MgO	15	4
	DPTT	2	2
Peroxide	Rubber blends	100	1
	TAC	4	2
	DCP	3.27	3
Mixed	Rubber blends	100	1
	MgO	20	4
	TAC	4	2
	DCP	3.27	3
Resin	Rubber blends	100	1
	ZnO	5	1
	Stearic acid	1	1
	SP-1045	9	3
	SnCl ₂	0.6	2

1.4 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการเบลนด์

เลือกใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่ให้สมบัติดีที่สุดจากหัวข้อ 1.3 คือระบบแมกนีเซียมออกไซด์ (การใช้ MgO ร่วมกับสารให้กำมะถัน DPTT) ดังตารางที่ 2 โดยการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 %โดยน้ำหนัก โดยปรับความหนืดของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์ที่สภาวะเดียวกับหัวข้อ 1.3.1 เตรียมเป็นยางผสมสารเคมีจากการเบ

ลนค์ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนต่างๆ จากนั้นนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับหัวข้อ 1.3.1 และ 1.3.2

1.5 การศึกษาอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซค์

เลือกใช้ระบบการวัลคาไนซ์จากหัวข้อ 1.3 คือ ระบบผสม (Mixed system) กล่าวคือ ใช้ MgO, DCP และ TAC ดังตารางที่ 2 (เนื่องจากในการเบลนค์ยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่ใช้ MgO ร่วมกับ DPTT ให้ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนค์ที่มีความแข็งแรงต่ำ แปรรูปโดยการอัดเข้าได้ยาก) โดยการเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนที่ให้สมบัติดีที่สุดจากหัวข้อ 1.4 คือ 50/50 และ 75/25 % โดยน้ำหนัก แล้วแปรเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซค์ในยางธรรมชาติอิพอกไซค์ดังนี้คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซค์ โดยปรับความหนืดของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซค์ที่สถานะเดียวกับหัวข้อ 1.3.1 เตรียมเป็นยางคอมปาวด์จากการเบลนค์ที่อัตราส่วนต่างๆ จากนั้นนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับหัวข้อ 1.3.1 และ 1.3.2

1.6 การศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม

เลือกใช้ระบบการวัลคาไนซ์จากหัวข้อ 1.5 คือ ระบบผสม (Mixed system) ดังตารางที่ 2 โดยการเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 1.4 คือ 50/50 % โดยน้ำหนัก และใช้เปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซค์ที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 1.5 คือ 50 โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซค์ แล้วแปรปริมาณสารตัวเติมของซิลิกาและเขม่าดำ ดังนี้คือ 0, 20, 40 และ 60 phr ดังสูตรยางคอมปาวด์ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สูตรที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม

ยางและสารเคมี	Silica (VN3 GR), phr				Carbon black (N-330), phr			
	0	20	40	60	0	20	40	60
ADS หรือ ENR	50	50	50	50	50	50	50	50
CSM	50	50	50	50	50	50	50	50
MgO	20	20	20	20	20	20	20	20
TAC	8	8	8	8	8	8	8	8
DCP	4	4	4	4	4	4	4	4
Silica (VN3 GR)	0	20	40	60	0	20	40	60
DEG	0	1.2	2.4	3.6	-	-	-	-
Carbon black (N-330)	-	-	-	-	0	20	40	60

1.7 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

นำยางผสมสารเคมีที่เตรียมได้จากหัวข้อ 1.3 - 1.6 มารีดผ่านลูกกลิ้งให้ได้ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร โดยทำเครื่องหมายตามทิศของยางที่รีดออกจากลูกกลิ้ง (grain) แล้วตัดให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับเบ้า นำแผ่นยางที่ได้ไปอัดเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮดรอลิกดังรูปที่ 2 ที่อุณหภูมิ 160°C ตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ (Optimum Cure, t_{c90}) ที่ได้จากการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ ความดันที่ใช้ในการอัดยางเท่ากับ 500 psi จากนั้นตั้งยางวัลคาไนซ์ไว้เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ตามหัวข้อที่ 1.8.5 – 1.8.8



รูปที่ 2 เครื่องอัดเบ้า (Compression Moulding)

1.8 การวิเคราะห์และการทดสอบ

1.8.1 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ด้วยเครื่อง FT-IR

นำยางธรรมชาติไอพอกไซด์ที่เตรียมได้ประมาณ 2 กรัม มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาละลายใน คลอโรฟอร์มตั้งทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนยางเกิดลักษณะเป็นเจล หลังจากนั้นนำเจลที่ได้ไปทาเป็น แผ่นฟิล์มบางๆ บนเซลล์โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) นำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C จนกระทั่งตัวทำละลายระเหย หมด หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) รุ่น Omnic ESP Magna-IR 560 ผลิตโดย บริษัท Nicolet Cooperation ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3 โดยอาศัยรังสี แม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอินฟราเรด ที่ช่วงเลขคลื่น $4000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$

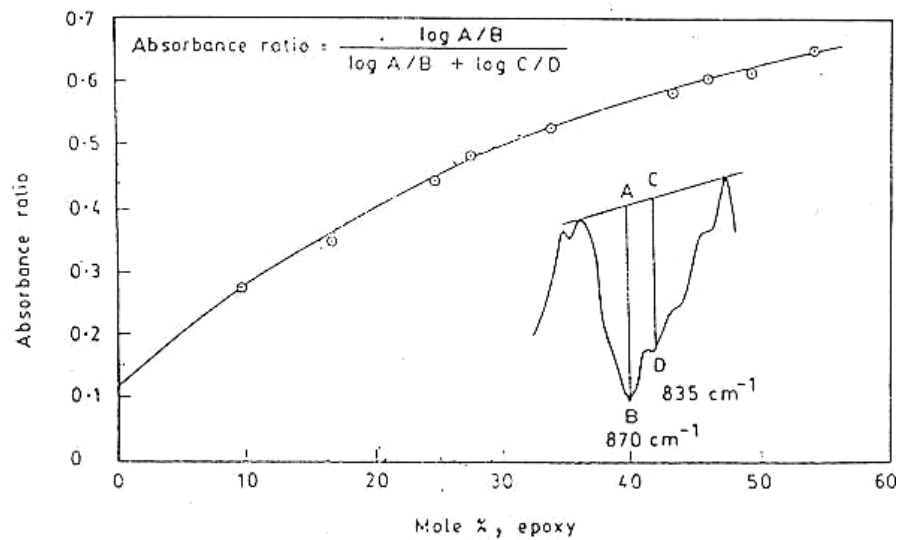


รูปที่ 3 ลักษณะของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Omnic ESP Magna-IR 560

จากหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในสเปกตรัมอินฟราเรดของยางไอพอกไซด์ โดยจะพบตำแหน่งของพีคที่ ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} และหมู่ epoxide ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} จากนั้นสามารถนำไป คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไอพอกไซด์ โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 835 cm^{-1} โดยคำนวณหาค่า absorbance ratio (Ar) โดยใช้สมการที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (Davey and Loadman, 1984) ดังรูปที่ 4

$$\text{Absorbance ratio, Ar} = \frac{\log A / B}{\log A / B + \log C / D} \quad (1)$$

โดยที่ A/B และ C/D เป็นความยาวของพีคการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ตามลำดับ



รูปที่ 4 กราฟมาตรฐานปริมาณหมู่อีพอกไซด์ (โมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์) กับค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 กับ 835 cm⁻¹ (Davey and Loadman, 1984)

1.8.2 ทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ โดยใช้เครื่อง Mooney Viscometer รุ่น AC/684/FD ผลิตโดยบริษัท SPRI Limited ประเทศสหราชอาณาจักร มีลักษณะดังรูปที่ 5 เป็นเครื่องมือวัดความหนืดของยางและยางคอมปาวด์ ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่หมุนในยางซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ วัดความหนืดจากแรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นในการหมุนของแผ่นโลหะด้วยความเร็วคงที่ในยางประมาณ 2 รอบต่อนาที



รูปที่ 5 เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney Viscometer)

1.8.3 การทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี

นำยางธรรมชาติอพอกไซค์ ยางธรรมชาติ และยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนต่างๆ โดยยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซค์จะปรับความหนืดโดยใช้สภาวะดังนี้คือ

- ใช้ลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30 °C
- ใช้เวลาบดยางธรรมชาติ 6 นาที ส่วนยางธรรมชาติธรรมชาติอพอกไซค์ใช้เวลา 3 นาที เพื่อให้มีความหนืด $ML(1+4) 125 ^\circ C = 39$ ซึ่งใกล้เคียงกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่ผ่านลูกกลิ้ง 1 ครั้ง

ทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีหรือสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี รียูฮอโรซาน (Rosand Capillary Extrusion Rheometer) ผลิตโดยบริษัท Rosand Precision Ltd. ประเทศสหราชอาณาจักร มีลักษณะดังรูปที่ 6 โดยใช้ตาย (die) ที่มีความยาว 32 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C และแปรอัตราเฉือน (Shear rate) ตั้งแต่ 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 400, 500, 700, 900, 1000, 1200, 1500 และ 1600 ต่อวินาที (s^{-1}) คำนวณและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Shear rate และ Shear viscosity กับ Shear rate



รูปที่ 6 ลักษณะของเครื่องรีโอมิเตอร์ แบบ Rosand Capillary Rheometer

1.8.4 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 1.3 - 1.6 มาทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ตามมาตรฐาน ASTM D2084-95 โดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer, ODR รุ่น 100S ผลิตโดยบริษัท Monsanto Co., Ltd.

ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 7 ทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้โรเตอร์เป็นแบบ Biconical Disk มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3996 นิ้ว ซึ่งหมุนกลับปามา 1 องศา ด้วยความถี่ 100 รอบต่อนาที



รูปที่ 7 ลักษณะของเครื่อง ODR 100S สำหรับทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิด (torque) กับเวลา แล้วรายงานผลค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_H) ช่วงระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time, t_{s1}) เวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time, t_{c90}) และอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI)

โดยที่

t_{s1} คือ ระยะเวลาเป็นนาทีจากจุดเริ่มต้นที่ทำให้แรงบิดสูงขึ้น 1 lb.in (dN.m) จากค่าแรงบิดต่ำสุด

$$t_{c90} = M_L + \frac{90(M_H - M_L)}{100} \quad (2)$$

$$CRI = \frac{100}{(t_{c90} - t_{s1})} \quad (3)$$

1.8.5 การทดสอบความต้านทานต่อการยืด

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 412-98 โดยใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบล ขนาดความยาว 115 มม. กว้าง 6 ± 0.4 มม. แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer รุ่น H 10KS ยี่ห้อ Hounfield มีลักษณะดังรูปที่ 8 ผลิตโดยบริษัท Hounfield test equipment ประเทศอังกฤษ ดึงด้วยอัตราการดึง 500 ± 50 มม./

นาที่ รายงานผลเป็นแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด (N/mm^2 หรือ MPa) คือค่าโมดูลัส (Modulus) และความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) รายงานเป็นระยะยืดสูงสุด คือ เปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด (% Elongation at break)



รูปที่ 8 ลักษณะของเครื่อง Tensometer

การคำนวณ

(i) $\text{Tensile strength} = F/A$ (4)

โดยที่

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

(ii) $\% \text{ Modulus} = F/A$ (5)

โดยที่

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืด 100, 200, 300, 400, 500 % (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

(iii) $\text{Elongation at break} = 100 \times (L-L_0)/L_0$ (6)

โดยที่

L = ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (cm)

L_0 = ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (cm)

1.8.6 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดมาตรฐาน ASTM D 624 โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบมูม (Die B) ขนาดความยาว 100 มม. กว้าง 19 ± 0.05 มม. แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer รุ่น H 10KS ยี่ห้อ Hounfield มีลักษณะดังรูปที่ 8 ดึงด้วยอัตราดึง 500 ± 50 มม./นาที

การคำนวณ

$$\text{Tear resistance} = \frac{F}{d} \quad (7)$$

โดยที่

F = แรงดึงจนขาด (N)

d = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

1.8.7 การวัดค่าความแข็ง

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240-97 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ Shore Durometer ผลิตโดยบริษัท Brevetti Affri ประเทศอิตาลี มีลักษณะดังรูปที่ 9 ความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น Shore A ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาน้อยกว่า 6 มม. หรือ 0.25 นิ้ว



รูปที่ 9 เครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A

1.8.8 การทดสอบการบวมพอง

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471 : fuel C เตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ใช้ชิ้นทดสอบแต่ละสูตร 3 ชิ้น ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ประมาณ 0.15 กรัม ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้น

นำไปแช่ในขวดรูปชมพู่ (Flash) ที่มีสารละลายโทลูอิน/ไอโซออกเทนเท่ากับ 50 cm³ (ในอัตราส่วน 50:50 % โดยปริมาตร) กดขึ้นทดสอบให้สารละลายผสมท่วม ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นอลูมิเนียม (Aluminium foil) เก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำขึ้นทดสอบซ้ำด้วยกระดาษชำระจนแห้ง นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน คำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมพอง ใช้สูตรดังนี้

$$\% \text{ Swelling} = \left(\frac{w - w_0}{w_0} \right) \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ w_0 คือ น้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนแช่ในสารละลาย

w คือ น้ำหนักขึ้นทดสอบหลังจากแช่ในสารละลาย

1.8.9 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA)

นำตัวอย่างยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ที่ต้องการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน มาชั่งน้ำหนักโดยประมาณไม่เกิน 10 มิลลิกรัม แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง TGA-50 ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 50 °C ถึง 800 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 20 °C/min ในบรรยากาศของไนโตรเจน แล้วรายงานผลที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์

1.8.10 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphological properties)

นำขึ้นทดสอบมาแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วแตกหักเพื่อให้ได้ผิวหน้าของขึ้นทดสอบใหม่จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 °C จากนั้นทำการเคลือบด้วยทองคำ โดยนำตัวอย่างวางในแท่นวางตัวอย่าง (stub) ซึ่งเป็นเครื่องสำหรับเคลือบภายใต้สุญญากาศ ปลดออกก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าไป แล้วปรับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.65 แอมแปร์ โดยใช้เวลาในการเคลือบทอง 1 นาที จะได้ความหนาในการเคลือบทองประมาณ 7.5 นาโนเมตร จากนั้นนำขึ้นทดสอบที่เคลือบทองแล้วไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเครื่องยี่ห้อ Leo รุ่น 1450 VP ประเทศอังกฤษ ดังรูปที่ 10 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า เพื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางเบลนด์



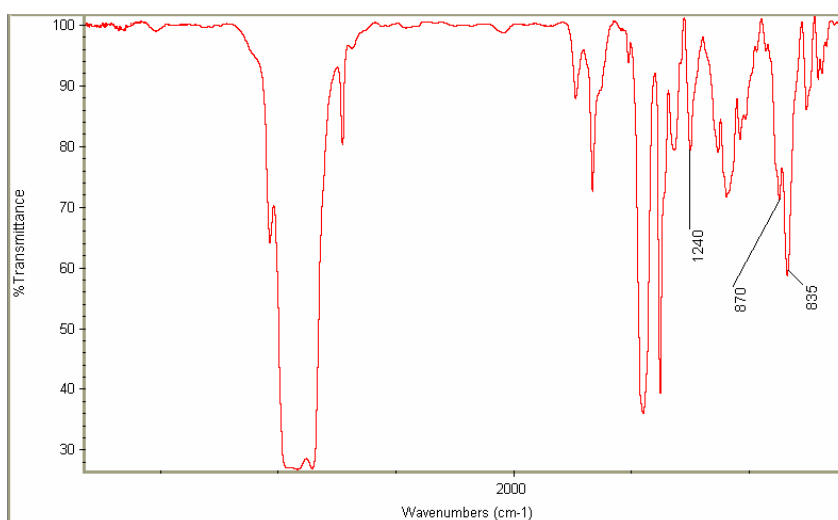
รูปที่ 10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

2.1 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

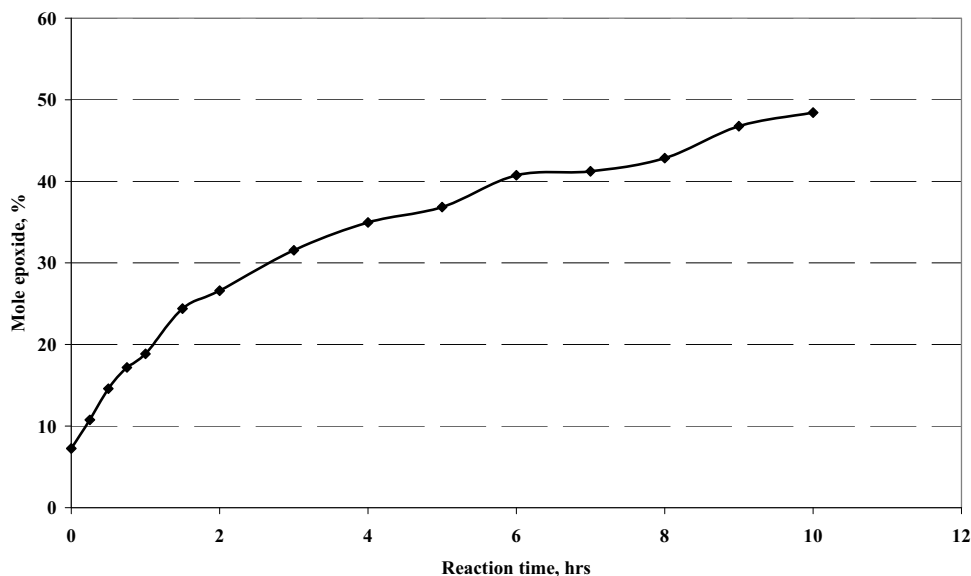
2.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

จากการวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่อุณหภูมิ 50 °C โดยนำตัวอย่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 30 mole % epoxide (ENR-30) ไปทดสอบด้วยเครื่อง FTIR จะได้สเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับปริมาณหมู่อีพอกไซด์เท่ากับ 30 mole % epoxide (ENR-30)

จากรูปที่ 11 พบว่าปรากฏพีคจากแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เกิดจากหมู่วงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) ซึ่งเป็นพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่อีพอกไซด์ที่เกิดขึ้นบนยางธรรมชาติ คือ มีพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} ซึ่งแสดงการเกิดวงแหวนออกซิเจนที่เกาะบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ นำสเปกตรัมที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณการเกิดหมู่อีพอกไซด์ (mole % epoxidation) โดยใช้อัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (Absorbance ratio) ของหมู่อีพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} เปรียบเทียบกับตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} (ซึ่งแสดงถึงการเกิด Out-of-plane bending) ของพันธะ C-H ที่เกาะกับ C=C ของ cis-1,4-polyisoprene ไปคำนวณหาค่า Absorbance ratio (Ar) โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในหน่วยโมลเปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันกับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ได้ดังรูปที่ 12



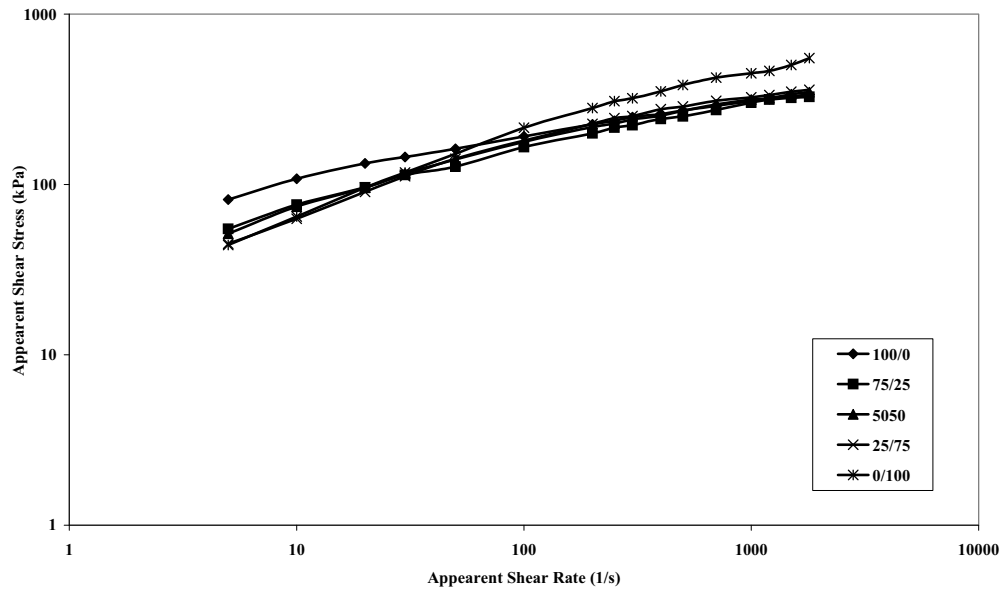
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 12 พบว่า เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นและสังเกตเห็นว่า ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยา 1 - 1.5 ชั่วโมง ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 1.5 ชั่วโมง ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันจะเกิดด้วยอัตราปฏิกิริยาที่ช้าลง

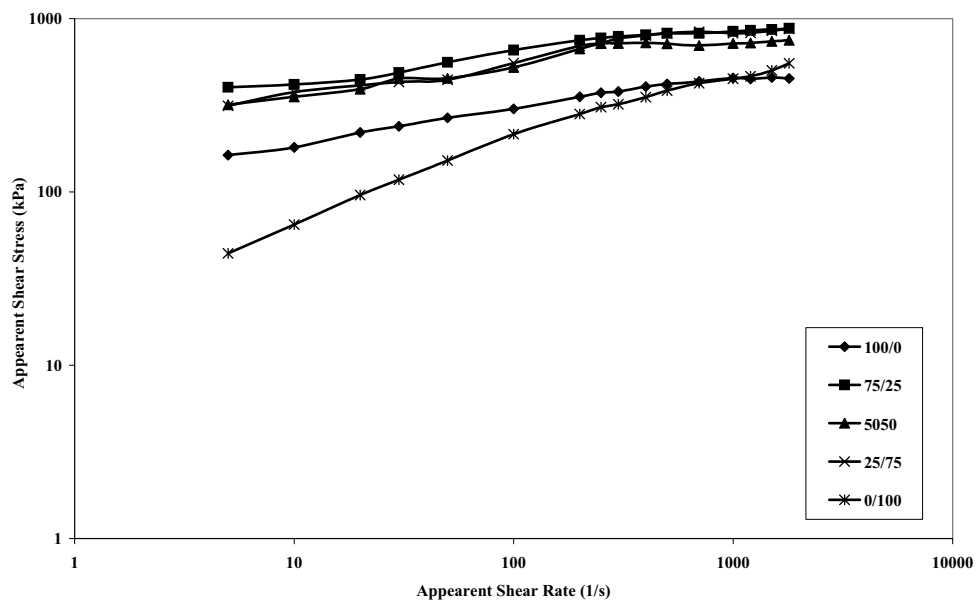
2.2 สมบัติทางรีโอโลยีของยางเบลนด์

2.2.1 สมบัติทางรีโอโลยีของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

จากการทำการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนต่างๆ ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 1.2.1 โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีที่อุณหภูมิ 160°C และทดสอบตามวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 1.8.3 โดยใช้ช่วงอัตราเฉือน $5-1800\text{ s}^{-1}$ การทดสอบจะเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนปรากฏกับความเค้นเฉือนปรากฏ และอัตราเฉือนปรากฏกับความหนืดเฉือนปรากฏ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 18 - 22

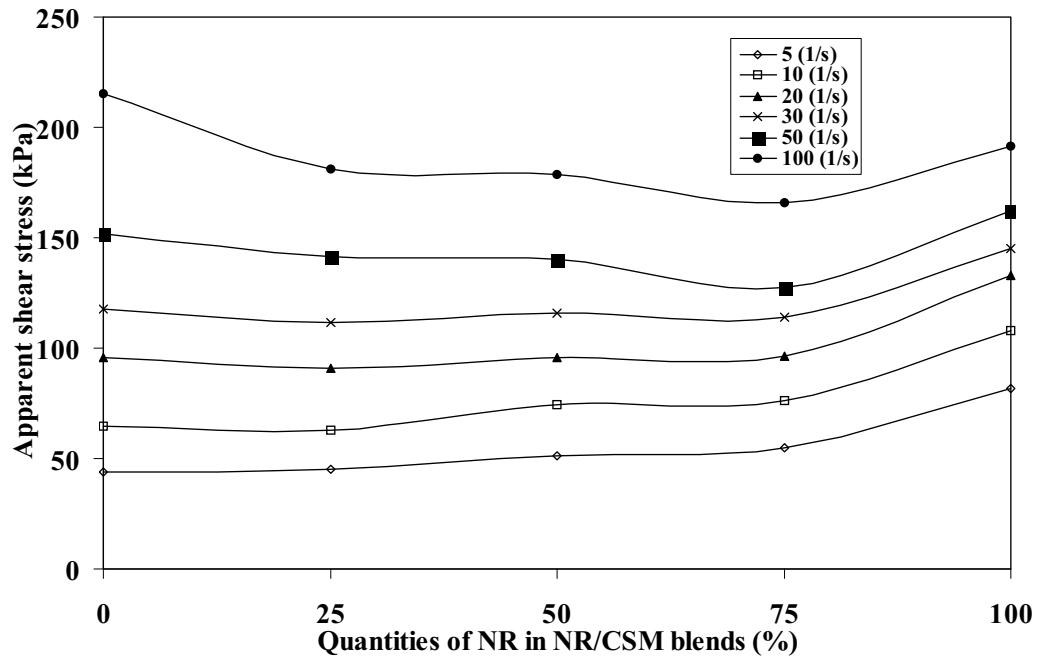


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนปรากฏกับความเค้นเฉือนปรากฏของ NR/CSM

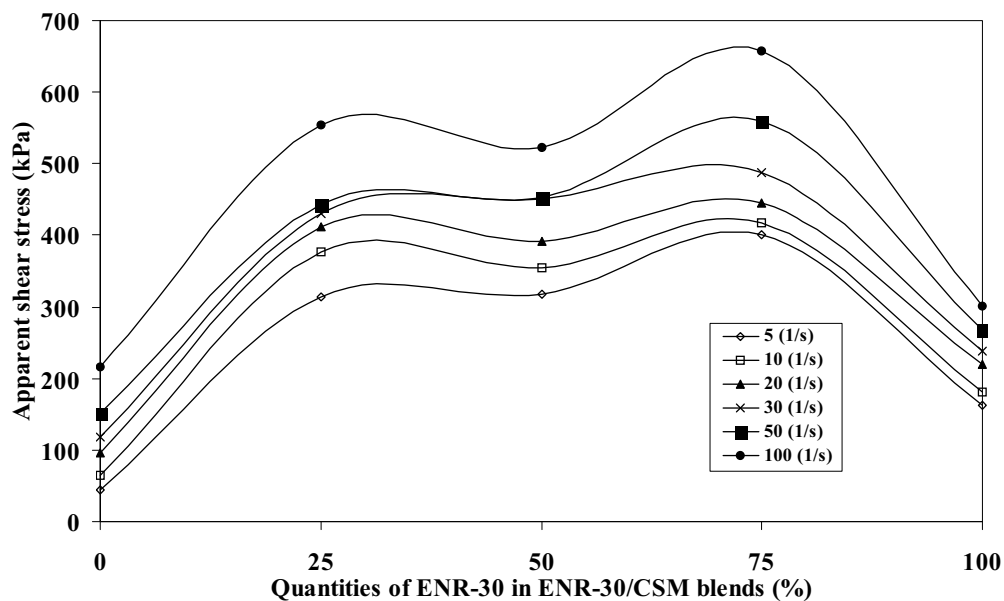


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนปรากฏกับความเค้นเฉือนปรากฏของ ENR-30/CSM

นำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ NR และ ENR-30 ในยางเบลดกับค่าความเค้นเฉือน ที่ อัตราการเฉือนคงที่ต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 15 - 16



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรากฏกับปริมาณยางธรรมชาติที่ใช้ในการเบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่าง ๆ



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรากฏกับปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการเบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่าง ๆ

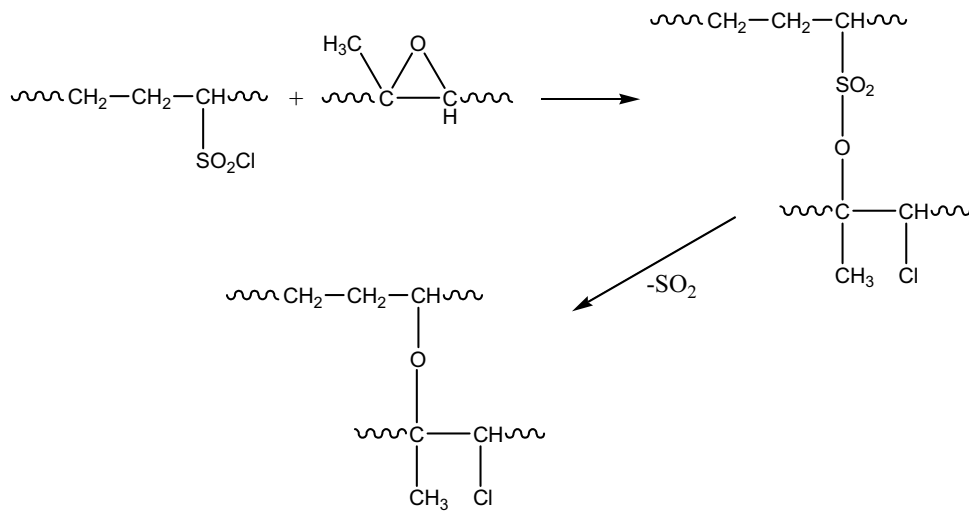
จากรูปที่ 13 - 14 พบว่า เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ทำให้ความเค้นเฉือนของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนและยางเบลนด์ระหว่างยางดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในกรณียางเบลนด์ ENR-30/CSM พบว่า ค่าความเค้นเฉือนของยางเบลนด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ใช้โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่อัตราส่วนการเบลนด์ ENR-30/CSM เท่ากับ 75/25 % โดยน้ำหนัก ในขณะที่ยางเบลนด์ NR/CSM นั้นพบว่า

ค่าความเค้นเฉือนมีค่าลดลงตามปริมาณของยางธรรมชาติในยางเบลนด์ แสดงว่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นจะได้รับอิทธิพลมาจากความหนืดของส่วนที่เป็นยางธรรมชาติอีพอกไซค์ การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของยางเบลนด์จะใช้หลักการ log-additive rule ดังสมการที่ 9

$$\log \eta_B = \sum_i w_i \log \eta_i \quad (9)$$

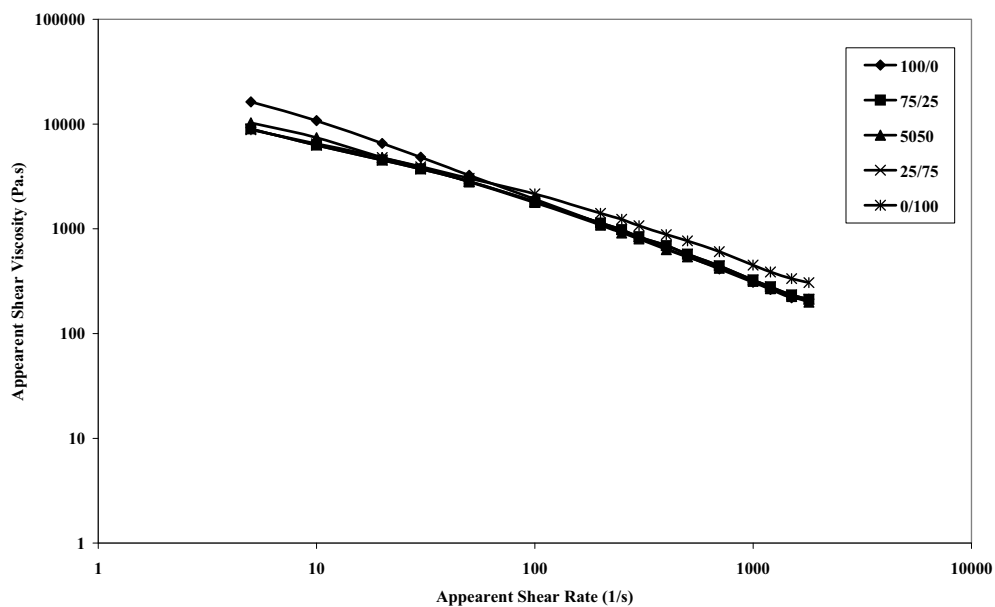
เมื่อ η_i = คือความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในการเบลนด์
 η_B = คือความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์
 W_i = คืออัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์เบลนด์แต่ละชนิด
 (weight fraction of the component)

จากสมการที่ 9 พบว่า ความหนืดของยางเบลนด์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการข้างต้นได้ว่า ความหนืดของยางเบลนด์วัดได้เป็นผลรวมของความหนืดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซค์คูณด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ และความหนืดของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนคูณด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนซึ่งถ้าระดับความหนืดของยางเบลนด์มีแนวโน้มเชิงบวก (Positive deviation blends, PDB) กล่าวคือ ได้กราฟลักษณะระฆังคว่ำ แสดงว่ายางเบลนด์จะเข้ากันได้ดี (Compatible blend) แต่ถ้ายางเบลนด์เข้ากันได้ไม่ดีหรือไม่เข้ากัน (Incompatible blend) จะทำให้ความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มเชิงลบ (Negative deviation blend, NDB) หรือกราฟแบบระฆังหงาย ดังนั้นจากสมการ log-additive rule เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM พบว่า ระดับความหนืดของการเบลนด์ NR/CSM มีแนวโน้มเชิงลบ แสดงว่าการเบลนด์ของ NR/CSM มีความไม่เข้ากันในการเบลนด์ กล่าวคือ จะทำให้ความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จาก log-additive rule มีแนวโน้มเชิงลบ แต่ยางเบลนด์ของ ENR-30/CSM มีแนวโน้มเชิงบวก แสดงว่าการเบลนด์ของ ENR-30/CSM มีความเข้ากันได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเบลนด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยตัวเอง (self-crosslinking reaction) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่หมู่ซัลโฟนิลคลอไรด์ (sulfonyl chloride) ของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนจะทำปฏิกิริยากับหมู่อีพอกไซค์ของยางธรรมชาติอีพอกไซค์โดยจะเกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslink) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 17 นอกจากนี้อาจเกิดจากแรงกระทำทางเคมี (Chemical interaction) ระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงคือ อะตอมคลอรีน และอะตอมออกซิเจนในโครงสร้างของยาง

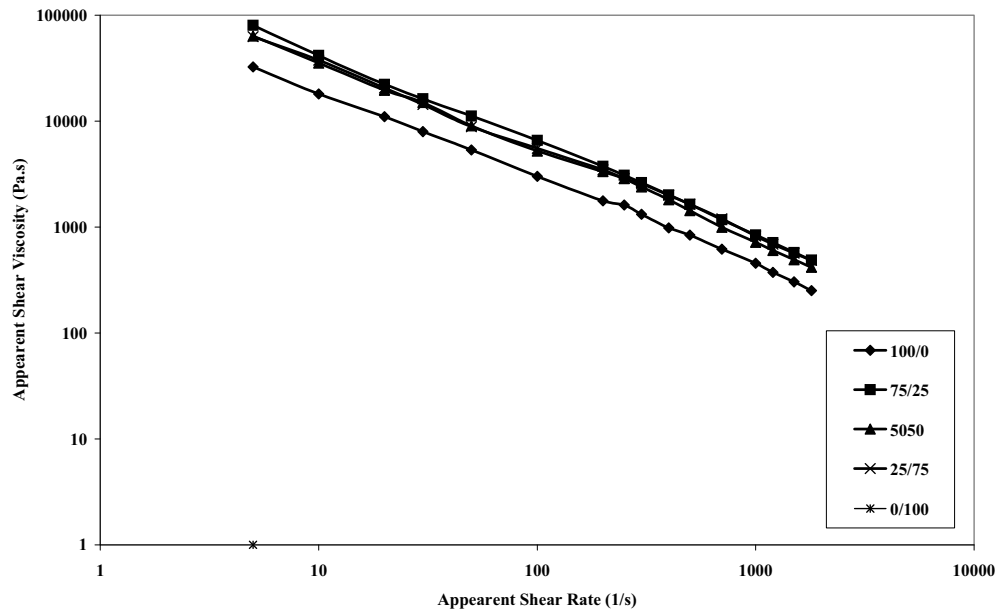


รูปที่ 17 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทีลีน

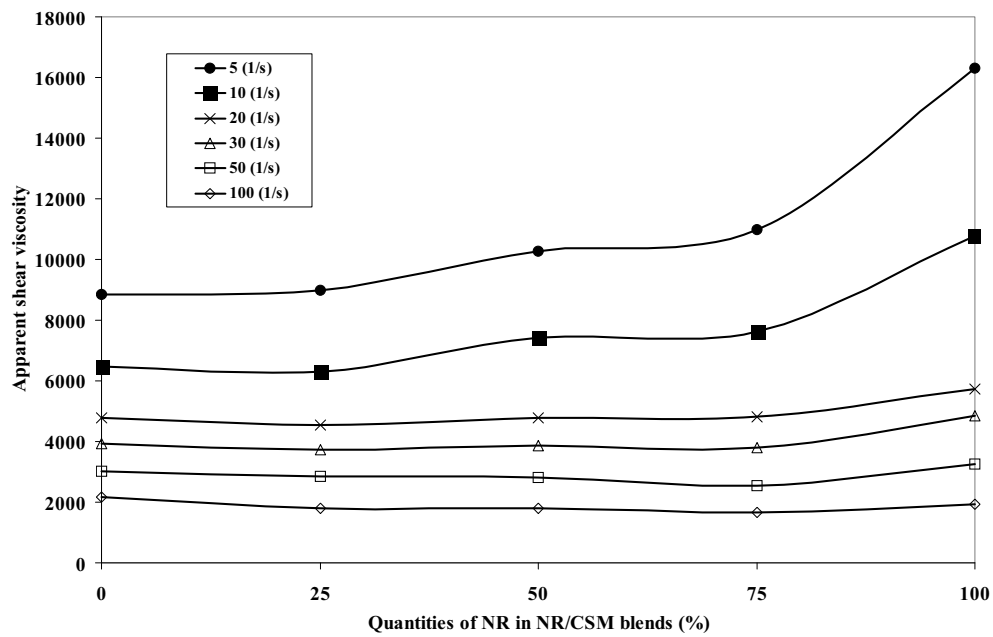
เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนปรากฏ (Apparent shear rate) กับความหนืดเฉือนปรากฏ (Apparent shear viscosity) ของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (Apparent shear rate) กับความหนืดเฉือน (Apparent shear viscosity) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 18 - 19 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับปริมาณยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในยางเบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 20 - 21



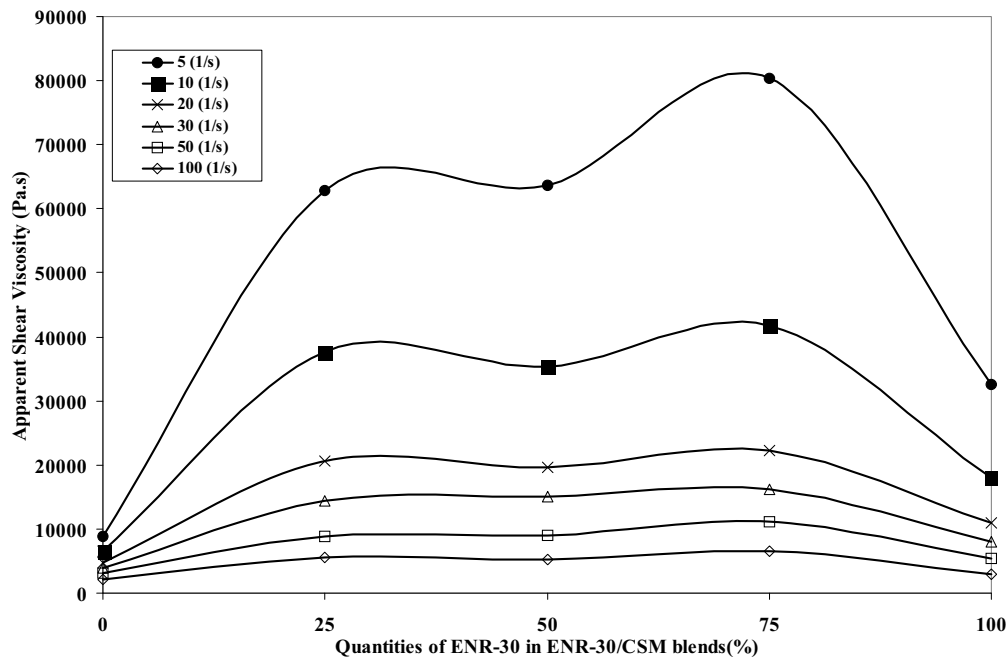
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนของ NR/CSM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนของและ ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนปรากฏกับปริมาณยางธรรมชาติที่ใช้ในการเบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่างๆ



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนปรากฏกับปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการเบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่าง ๆ

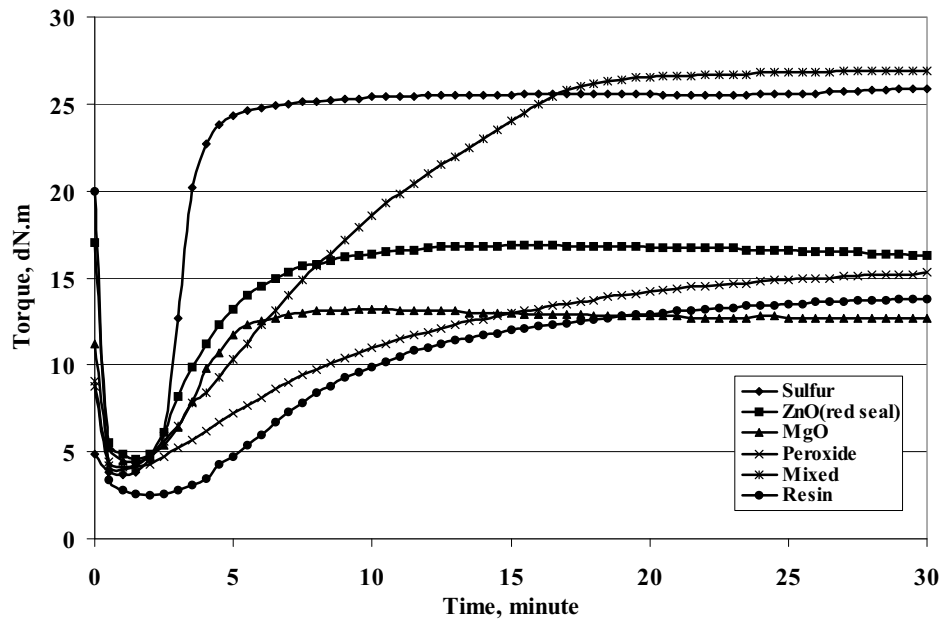
จากรูปที่ 18 - 19 พบว่า เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดเฉือนของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนและยางเบลนด์ของยางข้างต้นมีค่าลดลง ซึ่งยางเบลนด์ประพฤติตัวเป็นซูโดพลาสติก (pseudoplastic behavior) มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดเป็นแบบ shear-thinning behavior ซึ่งจากรูปที่ 18 และ 20 ค่าความหนืดเฉือนของยางเบลนด์ NR/CSM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นและมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ แสดงว่า การเบลนด์ไม่มีความเข้ากันได้ทุกสัดส่วนของ NR/CSM แต่จากรูปที่ 19 พบว่า ค่าความหนืดเฉือนของยางเบลนด์ ENR/CSM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ ENR-30 เพิ่มขึ้นโดยจะทำให้ได้ค่าความหนืดเฉือนสูงสุดที่ระดับการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เท่ากับ 75 % โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณการใช้ ENR-30 มากขึ้นกว่า 75 % โดยน้ำหนัก ในยางเบลนด์ ENR-30/CSM พบว่า ค่าความหนืดเฉือนปรากฏจะมีแนวโน้มลดลง และจากกราฟรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเชิงบวก ตาม log additive rule แสดงให้เห็นว่าการเบลนด์ของยาง ENR-30/CSM มีความเข้ากันได้มากที่สุด โดยเฉพาะที่อัตราส่วนของ ENR-30/CSM ที่สัดส่วน 75/25 % โดยน้ำหนัก

2.3 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์

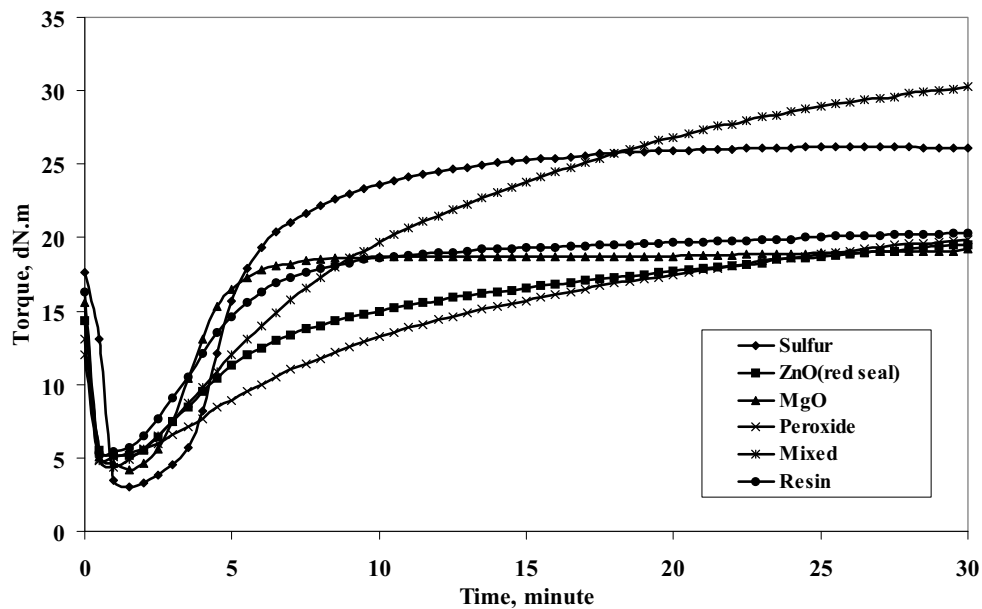
2.3.1 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์

ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM ที่อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ในการทดลองดังตารางที่ 2 ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่อง ODR 100S ที่อุณหภูมิทดสอบ 160°C ตามหัวข้อที่ 1.8.4 ได้ลักษณะกราฟแสดงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ (Cure curve) ของยาง

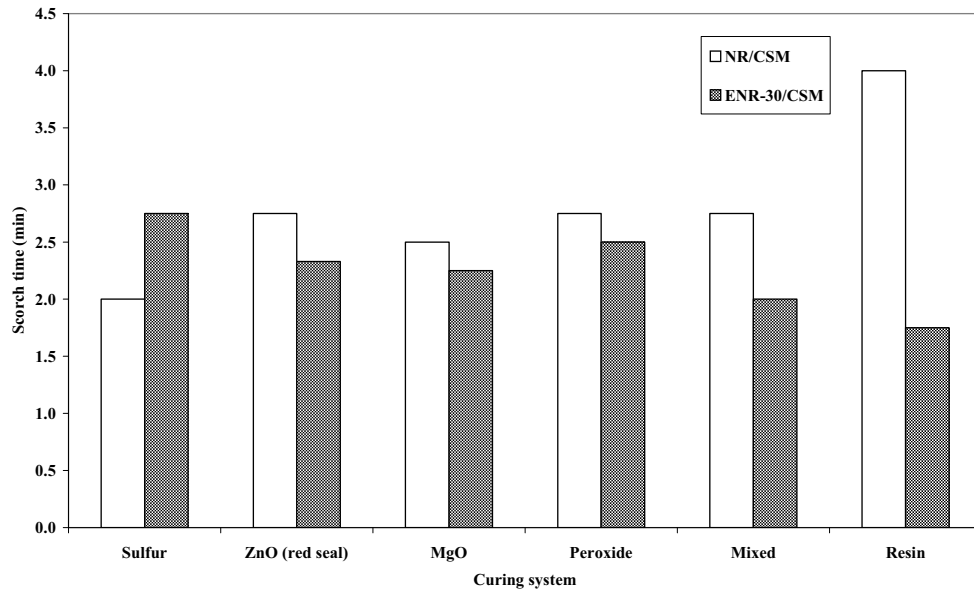
เบลดที่ใช้ระบบระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ ดังรูปที่ 22 - 23 นำข้อมูลที่ได้จากลักษณะการวัลคาไนซ์ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการวัลคาไนซ์กับระบบการวัลคาไนซ์ได้ดังรูปที่ 24 - 28



รูปที่ 22 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลดระหว่างยาง NR/CSM ที่อัตราส่วน 50/50 %โดยน้ำหนัก โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์

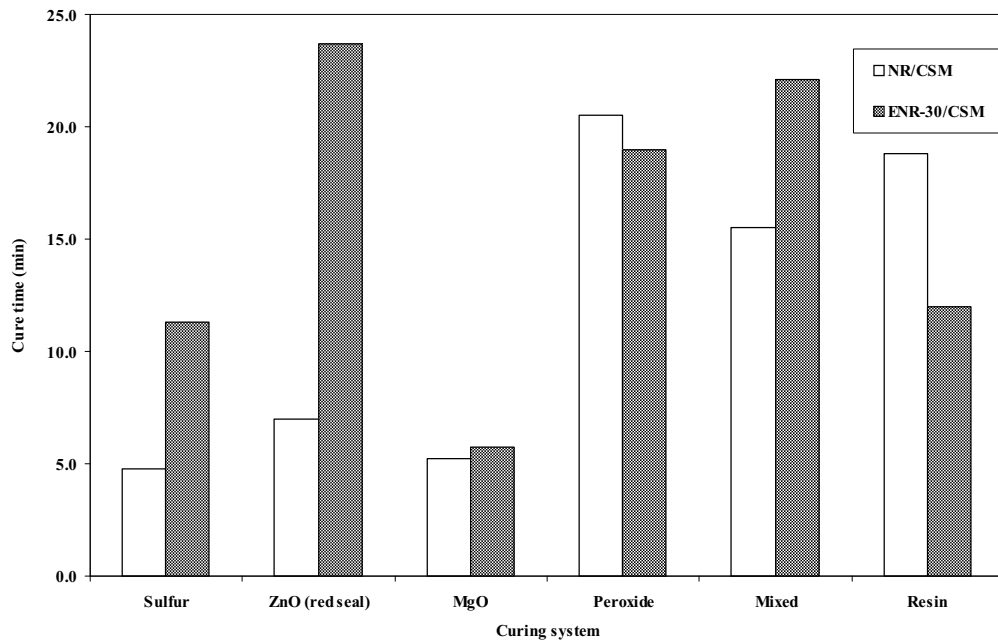


รูปที่ 24 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลดระหว่างยาง ENR-30/CSM ที่อัตราส่วน 50/50 %โดยน้ำหนัก โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์



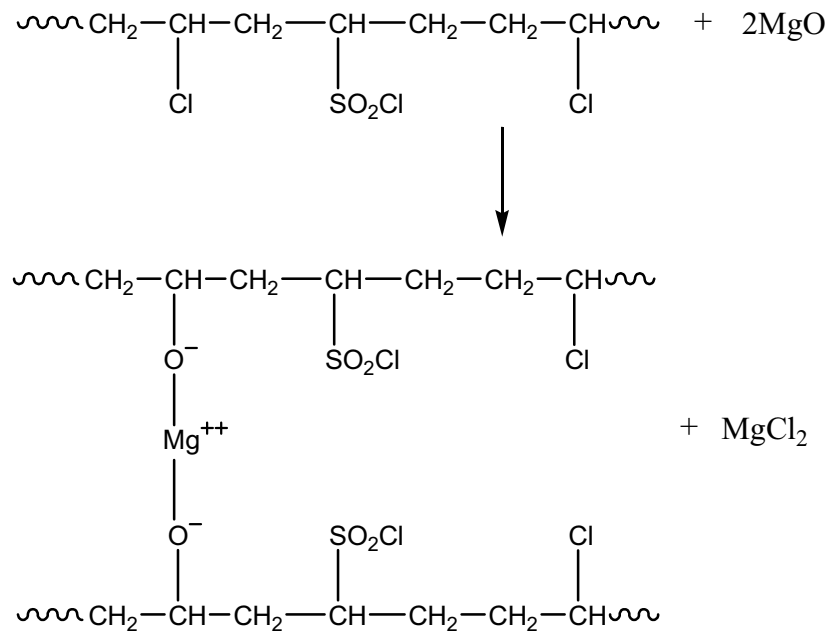
รูปที่ 24 ค่าเวลาสกอร์ชของยางเบลนด์ที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 24 พบว่า ค่า Scorch time หรือค่าเวลาที่สามารถขึ้นรูปได้ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 2-2.75 นาที ยกเว้นยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM ที่ใช้ในระบบวัลคาไนซ์ด้วยเรซินมีค่าเวลาสกอร์ชเท่ากับ 4.00 และ 1.75 นาที ตามลำดับ โดยการเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และใช้ระบบกำมะถัน (Sulfur) จะให้เวลาสกอร์ชสั้นที่สุด ในขณะที่ระบบเรซิน (Resin) จะให้เวลาสกอร์ชยาวที่สุด ส่วนในการเบลนด์ระหว่าง ENR-30/CSM พบว่า ระบบเรซิน (Resin) จะให้เวลาสกอร์ชสั้นที่สุด ส่วนระบบกำมะถันจะให้เวลาสกอร์ชยาวที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางเบลนด์ทั้งสองชนิด พบว่า ยางเบลนด์ระหว่าง ENR-30/CSM มีค่าเวลาสกอร์ชสั้นกว่าหรือเกิดการเริ่มต้นการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่ายางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ NR/CSM

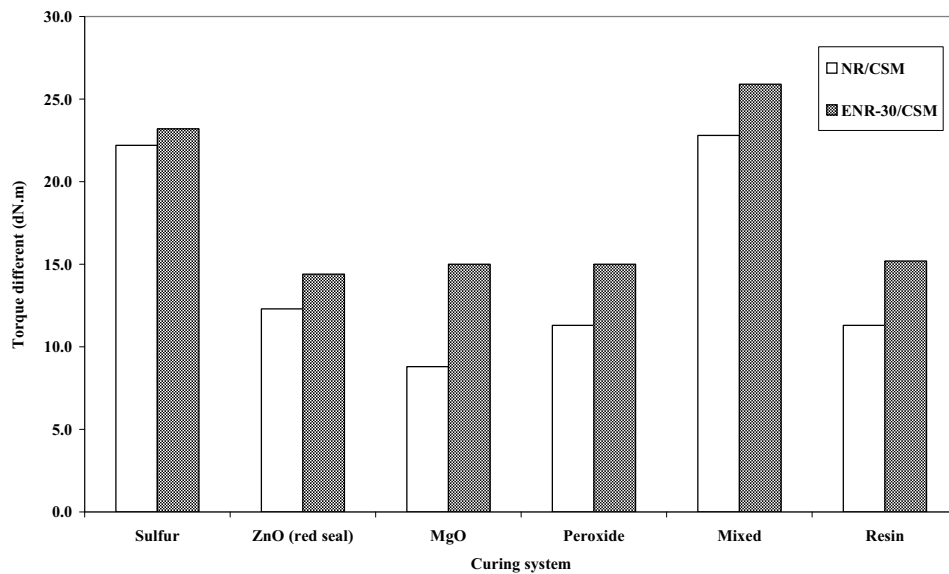


รูปที่ 25 ค่าเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 25 พบว่า ยางเบลนด์ NR/CSM ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมีค่าเวลาวัลคาไนซ์ต่ำที่สุดหรือเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็ว ในขณะที่ระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าสูงสุด เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไว โดยสูตรที่ใช้เป็นระบบกำมะถันที่ใช้สารตัวเร่งปริมาณสูงคือ ใช้ TMTD = 0.5 phr, TBBS = 2.4 phr และกำมะถัน 0.75 phr (ซึ่งเป็นระบบอีวี) จึงเกิดพันธะเชื่อมโยงได้เร็วกว่าระบบการวัลคาไนซ์สูตรอื่นๆ ส่วนค่าเวลาวัลคาไนซ์ (Cure time) ของยางเบลนด์ ENR-30/CSM ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับสารให้กำมะถัน (MgO + DPTT) มีค่าเวลาสก๊อตต่ำสุด ขณะที่ระบบซิงค์ออกไซด์ร่วมกับสารให้กำมะถัน (ZnO Red seal + DPTT) มีค่าสูงสุด เนื่องจากยาง ENR-30 เป็นยางที่มีความเป็นขี้มีวงแหวนอีพอกไซด์อยู่ในสายโซ่โมเลกุลและยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นยางที่มีความเป็นขี้เนื่องจากมีหมู่ของคลอรีนและคลอโรซัลโฟเนตอยู่ในสายโซ่โมเลกุล จึงทำให้ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ได้ดี ซึ่งทำให้เกิดการพันธะเชื่อมโยงได้ทั้งสองเฟสซึ่งเป็นระบบวัลคาไนซ์แบบไอออนิก ดังสมการที่ 26 จึงทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงได้เร็วกว่าระบบการวัลคาไนซ์สูตรอื่นๆ รวมทั้งเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยตัวเองดังรูปที่ 17 และเกิดพันธะโควาเลนต์จากการวัลคาไนซ์ด้วยสารให้กำมะถัน



รูปที่ 26 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน

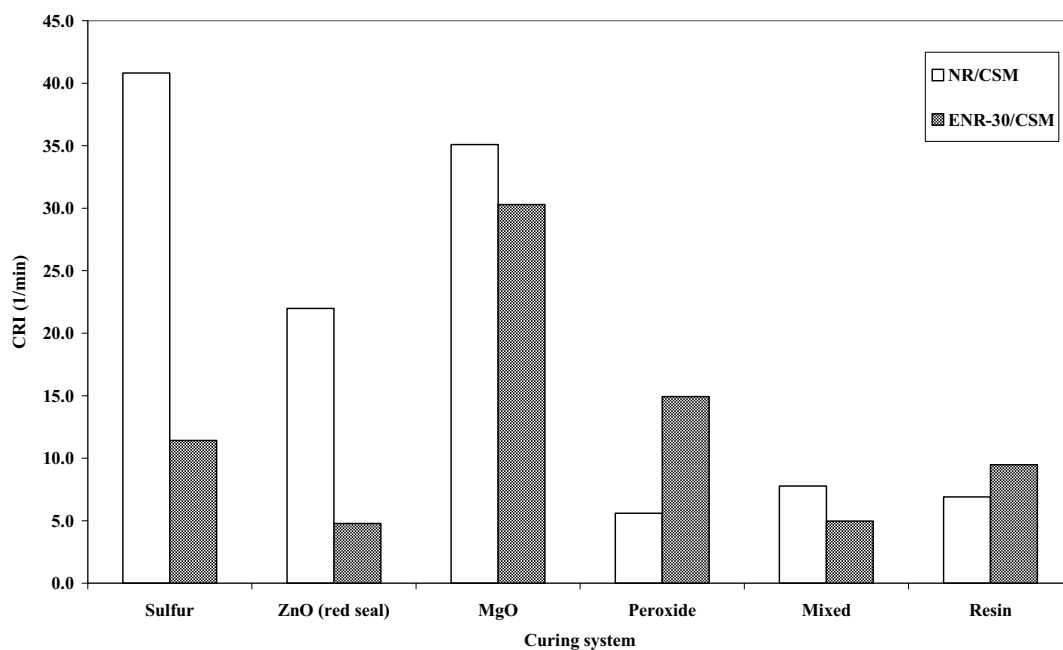


รูปที่ 27 ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 27 พบว่า ยางเบลนด์ NR/CSM ที่ใช้ระบบผสม (MgO+Peroxide+TAC) จะให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดมากที่สุด ส่วนระบบแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO+DPTT) จะให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดน้อยที่สุด เพราะมีพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่ในเฟสของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเท่านั้นซึ่งเป็นเฟสที่มีขั้ว โดยแมกนีเซียมออกไซด์จะเกิดการเชื่อมโยงกับหมู่ที่มีขั้วของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นแบบไอออนิก ดังสมการในรูปที่ 2.6 และกำมะถันที่ได้จากสารที่ให้กำมะถัน คือ (Sulfur donor) คือ DPTT จะเกิดการเชื่อมโยงส่วนที่เป็นพันธะคู่ในยางธรรมชาติ ส่วนในยางเบลนด์ ENR-30/CSM ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO+DPTT) จะให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดมากที่สุด เพราะมีการเกิดพันธะเชื่อมโยงทั้งสองเฟสของยางเบลนด์ ส่วนระบบซิงค์ออกไซด์ (ZnO Red seal + DPTT) จะให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดที่ต่ำที่สุด เพราะ ZnO ชนิด red seal จะ

เกิดพันธะเชื่อมโยงได้ในเฟสของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน แต่ในยางธรรมชาติออกไซด์ซึ่งค็อกซ์ออกไซด์จะมีบทบาทเป็นสารกระตุ้นมากกว่าเป็นสารวัลคาไนซ์ ในขณะที่สารให้กำมะถัน DPTT สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงในเฟสของยางธรรมชาติออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ หรือยางธรรมชาติออกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน พบว่า ยางเบลนด์ ENR-30/CSM จะให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดสูงกว่ายางเบลนด์ NR/CSM ทุกระบบการวัลคาไนซ์ที่ทำการวิจัย เนื่องจากในยางธรรมชาติออกไซด์สามารถเกิดแรงกระทำทางเคมี ซึ่งเกิดแรงดึงดูดภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติออกไซด์ เนื่องจากหมู่ของออกซิเรน (Oxirane ring) รวมทั้งสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงกันเองระหว่างยางธรรมชาติออกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน จึงส่งผลให้ยางเบลนด์ที่ใช้ยางธรรมชาติออกไซด์มีค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดสูงกว่ากรณีที่ใช้ยางธรรมชาติ



รูปที่ 28 อัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

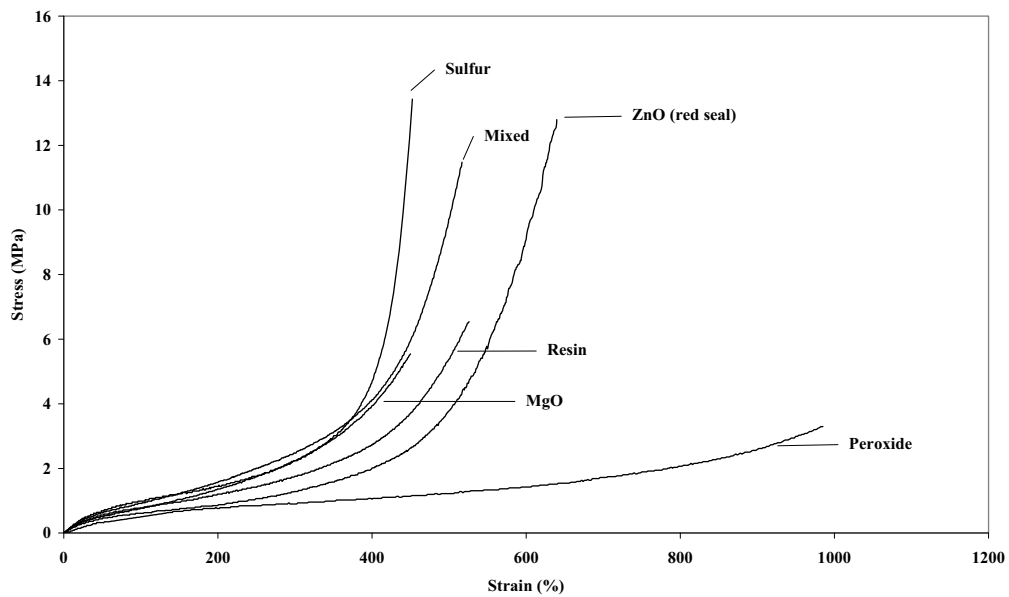
จากรูปที่ 28 พบว่า ยางเบลนด์ NR/CSM ที่ใช้ระบบกำมะถันแบบอีวี (EV system) จะให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่สูงที่สุด ในขณะที่ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide+TAC) จะให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่ต่ำที่สุด ส่วนในยางเบลนด์ ENR-30/CSM การใช้ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO+DPTT) จะให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่สูงที่สุด ส่วนระบบซิงค์ออกไซด์ (ZnO Red seal) จะให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่ต่ำที่สุด

2.3.2 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติทางกายภาพ

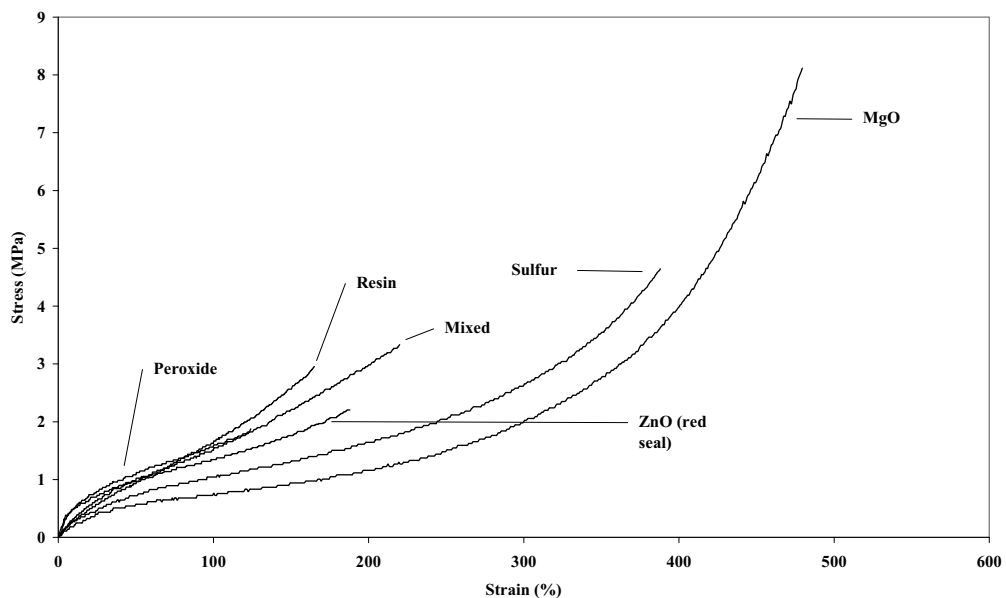
นำยางวัลคาไนซ์ที่ได้เตรียมได้ตามหัวข้อที่ 1.3.1 ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพตามหัวข้อที่ 1.8.5 – 1.8.8 ได้ผลการทดลองดังนี้

2.3.2.1 ความทนทานต่อแรงดึง

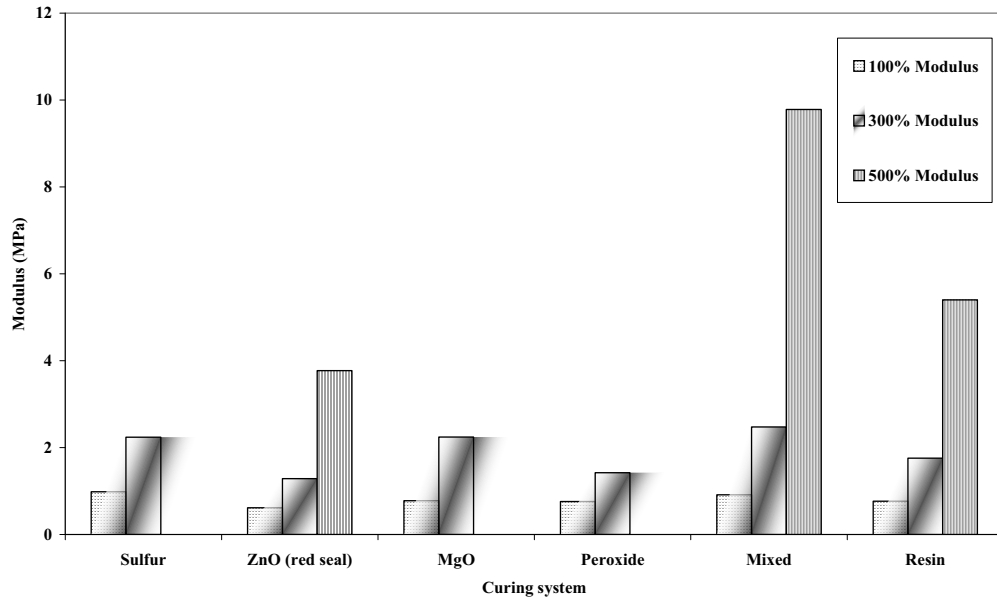
นำยางวัลคาไนซ์จากการเบลนดระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก มาทดสอบความทนทานต่อการดึง ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ดังรูปที่ 29 - 30 และได้ค่า 100, 300 และ 500 % โมดูลัส ของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบต่างๆ ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดสูงสุด ดังรูปที่ 31 - 35



รูปที่ 29 Stress-strain curve ของยางเบลนด NR/CSM ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

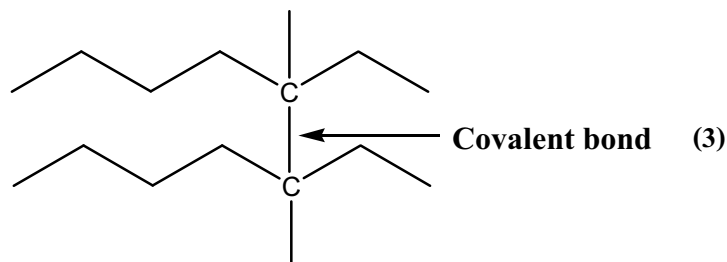


รูปที่ 30 Stress-strain curve ของยางเบลนด ENR-30/CSM ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

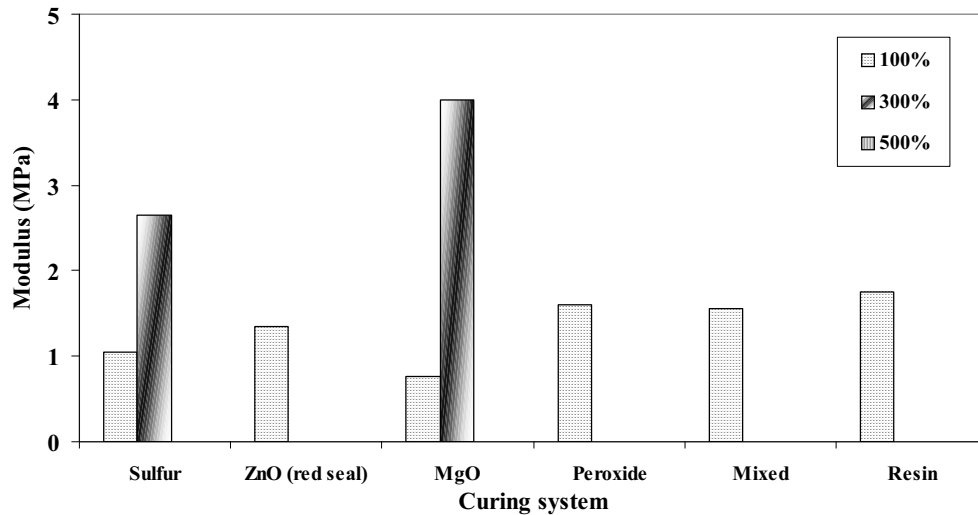


รูปที่ 31 ค่าโมดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การยัดต่างๆ ของยางเบลด NR/CSM

จากรูปที่ 31 เมื่อเปรียบเทียบค่า 300% โมดูลัส ของยางเบลด NR/CSM พบว่า ระบบวัลคาไนซ์แบบผสม (MgO+Peroxide + TAC) จะให้ค่า 300% โมดูลัส สูงที่สุด รองลงมาคือ กำมะถัน (Sulfur), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO + DPTT), เรซิน (SP-1045 + SnCl_2), เปอร์ออกไซด์ (Peroxide + TAC) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO red seal + DPTT) ตามลำดับ สาเหตุที่ระบบวัลคาไนซ์แบบผสมให้ค่า 300% โมดูลัส สูงที่สุด เนื่องจากเป็นระบบผสมของระบบเปอร์ออกไซด์กับแมกนีเซียมออกไซด์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะทั้งสองแบบคือ แบบโคเวเลนต์ (ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 32) และแบบไอออนิก (ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 26) ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าระบบวัลคาไนซ์แบบอื่นๆ

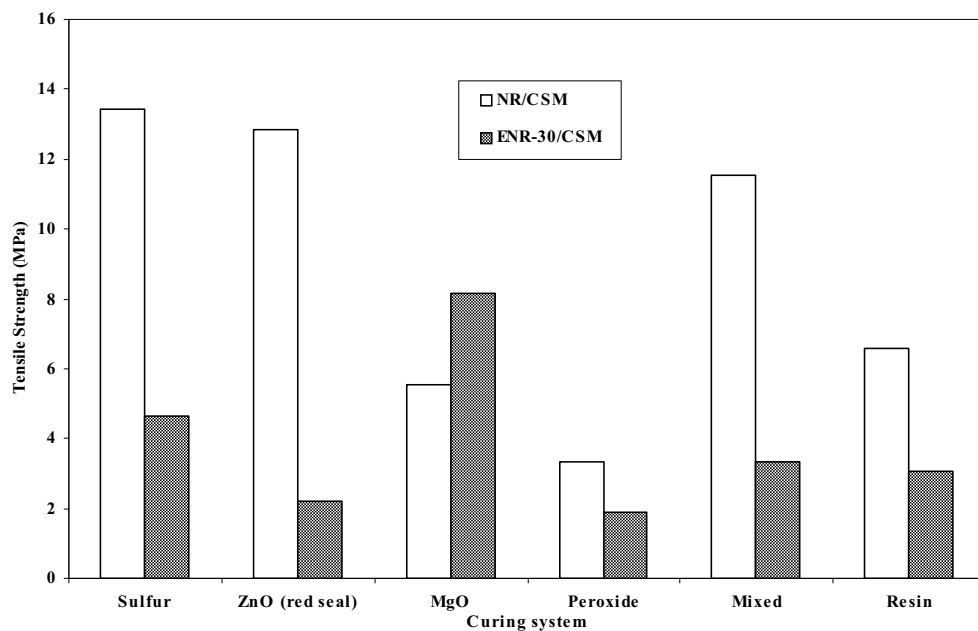


รูปที่ 32 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยพันธะโคเวเลนต์



รูปที่ 33 ค่าโมดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การยืดต่างๆ ของยางเบลนด์ ENR-30/CSM

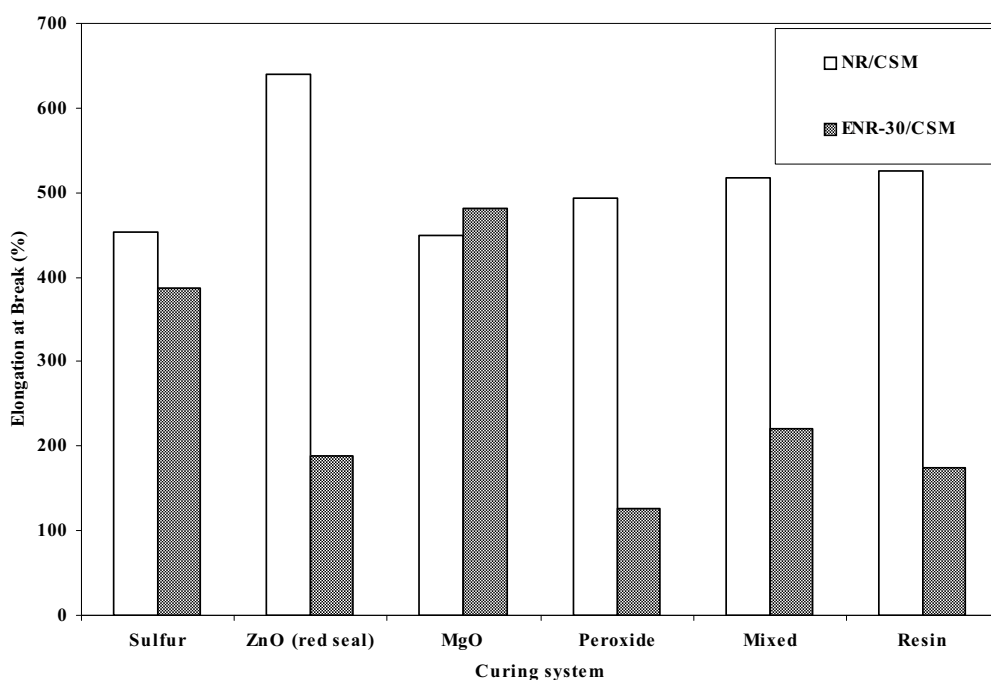
จากรูปที่ 33 เมื่อเปรียบเทียบยางเบลนด์ ENR-30/CSM พบว่า ระบบวัลคาไนซ์แบบเรซิน จะให้ค่า 100% โมดูลัสสูงที่สุด รองลงมาคือ เปอร์ออกไซด์ สาเหตุที่ระบบวัลคาไนซ์แบบแมกนีเซียมออกไซด์ ให้ค่า 100% โมดูลัสสูงที่สุดเนื่องจากเรซินชนิด SP-1045 ที่ใช้เป็นชนิดโรซัลฟอนิก ซึ่งมีโครงสร้างแข็งตึง (Stiffness) คือ มีวงแหวนอะโรมาติก นอกจากนี้ยาง ENR-30 เป็นยางที่มีความเป็นขั้วเนื่องจากมีวงแหวนอีพอกไซด์อยู่ในสายโซ่โมเลกุล และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนก็เป็นยางที่มีความเป็นขั้วเนื่องจากมีหมู่ของคลอรีนและคลอโรซัลโฟเนตอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเองได้ (Self-crosslinkable) เนื่องจากยางที่ใช้ในการเบลนด์เป็นยางที่มีขั้ว



รูปที่ 34 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ

จากรูปที่ 34 พบว่า การเบลนดระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM ในอัตราส่วน 50/50 %โดยน้ำหนัก โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ การเบลนด NR/CSM จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า ENR-30/CSM ทุกระบบวัลคาไนซ์ ยกเว้นระบบแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO+DPTT) โดยที่ยางเบลนด NR/CSM มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงเนื่องจากในโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไว ส่วนในโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีพันธะคู่น้อยกว่า จึงทำให้ยางธรรมชาติเกิดพันธะเชื่อมโยงที่ตำแหน่งพันธะคู่ระหว่างโซ่โมเลกุลได้มากตามไปด้วย นอกจากนี้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อดึง จึงมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ในขณะที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเกิดผลึกได้น้อยกว่า

ส่วนยางเบลนด ENR-30/CSM ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO+DPTT) จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่ายางเบลนด NR/CSM ที่ใช้ระบบเดียวกัน เนื่องจาก ENR-30 เป็นยางที่มีความเป็นขี้ผึ้งโดยมีวงแหวนอีพอกไซด์อยู่ในสายโซ่โมเลกุล และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นยางที่มีความเป็นขี้ผึ้งเนื่องจากมีหมู่ของคลอรีนและคลอโรซัลโฟนิลอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเองได้ (Self-crosslinkable) ได้ ทำให้เกิดการเชื่อมพันธะได้ทั้งสองเฟส จึงเกิดการเชื่อมโยงของพันธะได้แข็งแรงกว่าระบบวัลคาไนซ์แบบอื่นๆ ที่ใช้ในยางเบลนด ENR-30/CSM กล่าวคือ เกิดพันธะเชื่อมโยง หรือแรงกระทำทางเคมีได้ 3 ลักษณะคือ (1) เกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเอง (2) พันธะโควาเลนต์จากการใช้กำมะถัน (เกิดจากการสลายตัวจากสารที่ให้กำมะถัน คือ DPTT) เป็นสารเชื่อมโยง และ (3) พันธะไอออนิก เกิดจากการใช้แมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 35 ค่าความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ของยางเบลนดที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

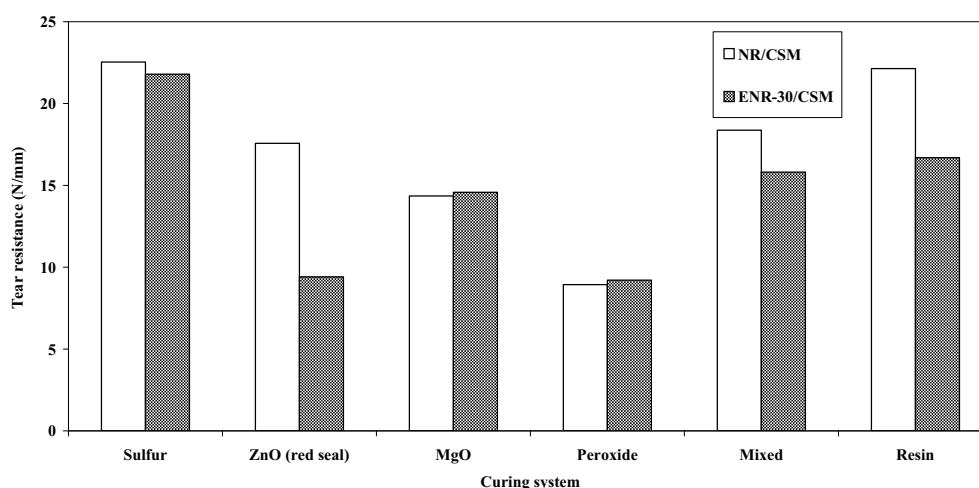
จากรูปที่ 35 เป็นความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนดระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM ในอัตราส่วน 50/50 %โดยน้ำหนัก โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ มีผลต่อค่าความสามารถในการยืดจนขาด และการเบลนดระหว่าง NR/CSM มีค่าความสามารถในการยืดจนขาดมากกว่า

ยางเบลนด์ ENR-30/CSM ในทุกระบบวัลคาไนซ์ ยกเว้นระบบที่ใช้ $\text{MgO} + \text{DPTT}$ ทั้งนี้เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์แตกต่างกัน กล่าวคือ ยางธรรมชาติมีค่า $T_g = -70^\circ\text{C}$ ในขณะที่ยาง ENR-30 มีค่า $T_g = -34^\circ\text{C}$ (วัชรินทร์, 2545) โดยที่ยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM ที่ใช้ระบบซิงค์ออกไซด์ (ZnO Red seal + DPTT) จะให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคือ ระบบ- เรซิน ($\text{SP-1045} + \text{SnCl}_2$) ระบบผสม ($\text{MgO} + \text{Peroxide} + \text{TAC}$) ระบบเปอร์ออกไซด์ ($\text{Peroxide} + \text{TAC}$) ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ ($\text{MgO} + \text{DPTT}$) และระบบกำมะถัน (Sulfur : EV system) ตามลำดับ

ส่วนยางเบลนด์ ENR-30/CSM ที่ใช้ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ ($\text{MgO} + \text{DPTT}$) จะให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่ายางเบลนด์ NR/CSM ที่ใช้ระบบเดียวกัน ส่วนระบบวัลคาไนซ์อื่นๆ ในยางเบลนด์ ENR-30/CSM มีค่าความสามารถในการยืดจนขาดน้อยกว่ายางเบลนด์ NR/CSM เนื่องจากการมีหมู่อิพอกไซด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ทำให้มีความแข็งตัวมากขึ้น และมีความยืดหยุ่นน้อยลง เนื่องจากแรงดึงดูดหรือแรงกระทำทางเคมีภายในระหว่างโมเลกุลยางธรรมชาติอิพอกไซด์เพิ่มขึ้นและพันธะโควาเลนต์หรือแรงกระทำทางเคมีระหว่างยางเบลนด์ทั้ง 2 ชนิด

2.3.2.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

นำยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ มาทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 36



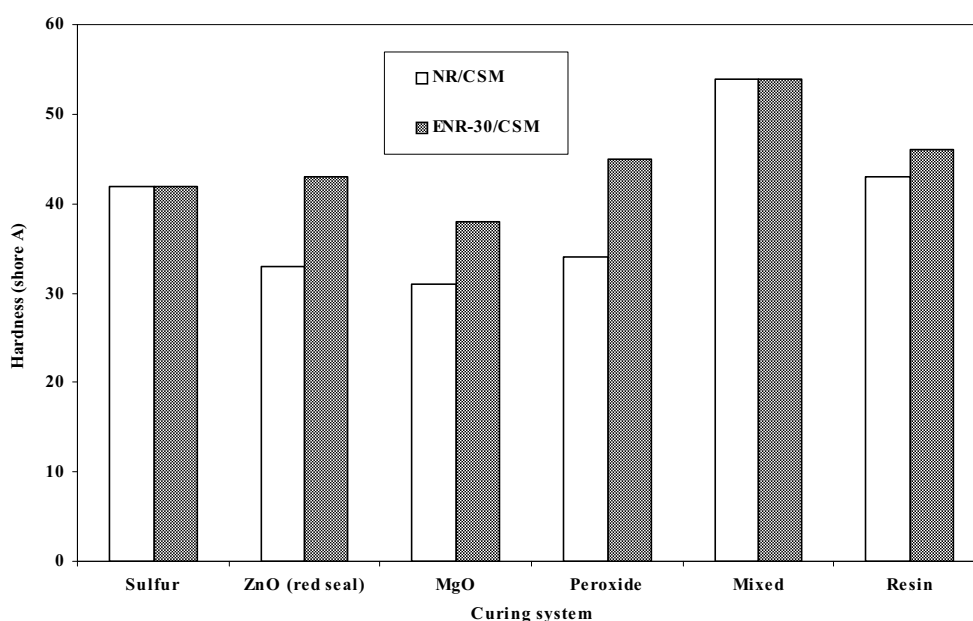
รูปที่ 36 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) ของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 36 เป็นความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM ในอัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก กับระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด โดยที่การใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน (Sulfur : EV system), ระบบซิงค์ออกไซด์ (ZnO red seal + DPTT), ระบบผสม ($\text{MgO} + \text{Peroxide} + \text{TAC}$) และ ระบบเรซิน ($\text{SP-1045} + \text{SnCl}_2$) ในยางเบลนด์ NR/CSM มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่ายางเบลนด์ ENR-30/CSM ในขณะที่ระบบแมกนีเซียมออกไซด์และระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย โดยที่ยางเบลนด์ NR/CSM ที่ใช้ระบบกำมะถันมีค่า

ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงสุด รองลงมาคือ ระบบเรซิน ระบบผสม ระบบซิงค์ออกไซด์ ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ส่วนยางเบลนด์ ENR-30/CSM พบว่า การใช้ระบบกำมะถันมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงสุด รองลงมาคือ ระบบเรซิน (Resin), ระบบผสม (MgO+Peroxide), ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ระบบซิงค์ออกไซด์ (red seal ZnO) และระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ตามลำดับ

2.3.2.3 ความแข็ง

นำยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ มาทดสอบความแข็ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 37



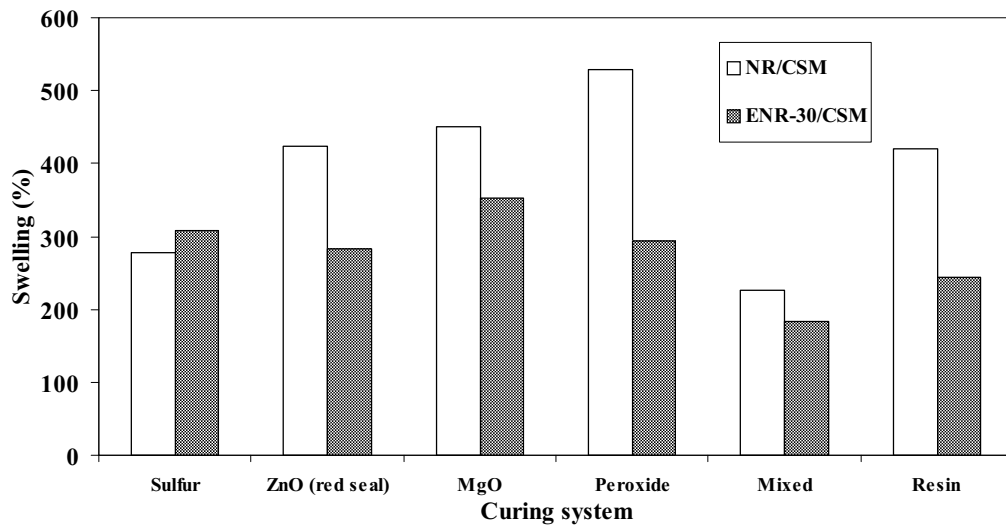
รูปที่ 37 ค่าความแข็ง (Hardness) ของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 37 เป็นความสัมพันธ์ของความแข็งของยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM ในอัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ พบว่า ระบบผสม (MgO + Peroxide + TAC) จะให้ค่าความแข็งสูงที่สุดทั้งในกรณีของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM เนื่องจากระบบดังกล่าวสามารถเกิดการเชื่อมพันธะเชื่อมโยงได้ทั้งแบบโควาเลนต์และแบบไอออนิก ทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูง จึงส่งผลให้ความแข็งสูงตามไปด้วย โดยที่ยางเบลนด์ ENR-30/CSM มีค่าความแข็งมากกว่ายางเบลนด์ NR/CSM เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีหมู่อีพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่เพิ่มสภาพขั้วในยางธรรมชาติ ทำให้เกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว ทำให้ยางมีความแข็งมากยิ่งขึ้น และค่า Tg สูงขึ้น

2.3.2.4 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย

จากการทดสอบสมบัติด้านความทนทานต่อตัวทำละลายของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ หรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ในตัวทำละลายผสมระหว่างไอโซออกเทนกับโทลูอีน ใน

อัตราส่วน 50:50 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามหัวข้อที่ 1.8.8 ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 38



รูปที่ 38 เปอร์เซนต์การบวมพองของยางเบลนด์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

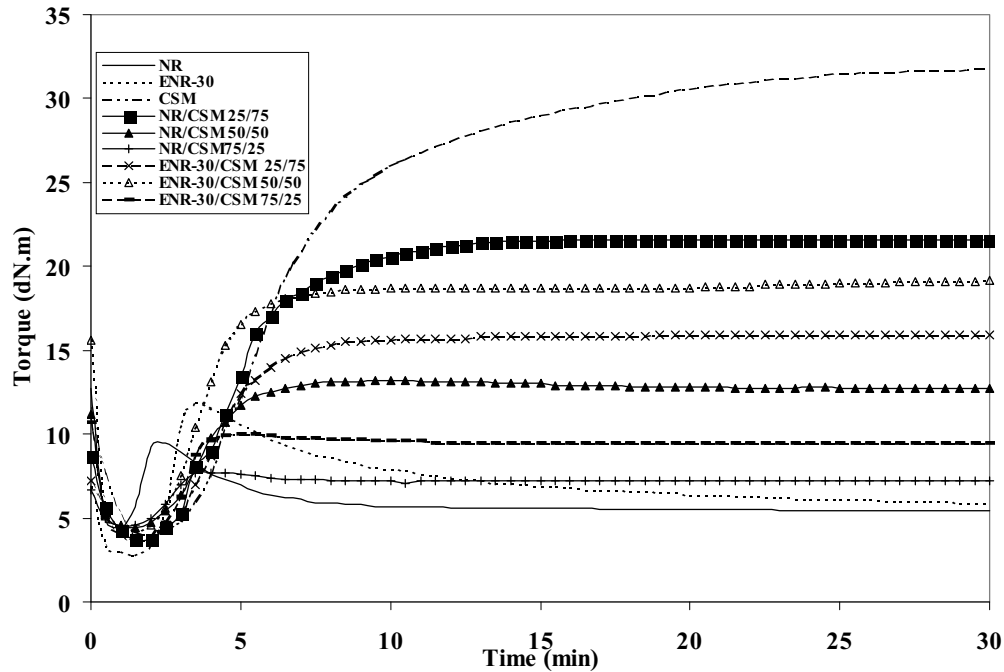
จากรูปที่ 38 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการบวมพองของยางเบลนด์ 2 ชนิด กับระบบการวัลคาไนซ์ พบว่า ยางเบลนด์ NR/CSM จะมีเปอร์เซนต์การบวมพองสูงกว่า ENR-30/CSM โดยที่ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) มีเปอร์เซนต์การบวมพองสูงที่สุด รองลงมาคือ ระบบแมกนีเซียมออกไซด์ ระบบซิงค์ออกไซด์ ระบบเรซิน ระบบกำมะถันแบบอีวี และระบบผสม ตามลำดับ โดยที่การใช้ระบบกำมะถันมีเปอร์เซนต์การบวมพองของยางเบลนด์ ENR-30/CSM สูงกว่ายางเบลนด์ NR/CSM เล็กน้อย เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวและมีปริมาณมากกว่า ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้มากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์จึงเกิดการบวมพองได้น้อยกว่านั่นเอง

ส่วนในระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่นๆ พบว่า ยางเบลนด์ ENR-30/CSM มีเปอร์เซนต์การบวมพองน้อยกว่า NR/CSM เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีความเป็นขี้วมมากกว่ายางธรรมชาติ โดยมีหมู่อิพอกไซด์อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงมีความทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้วมมากกว่ายางธรรมชาติ

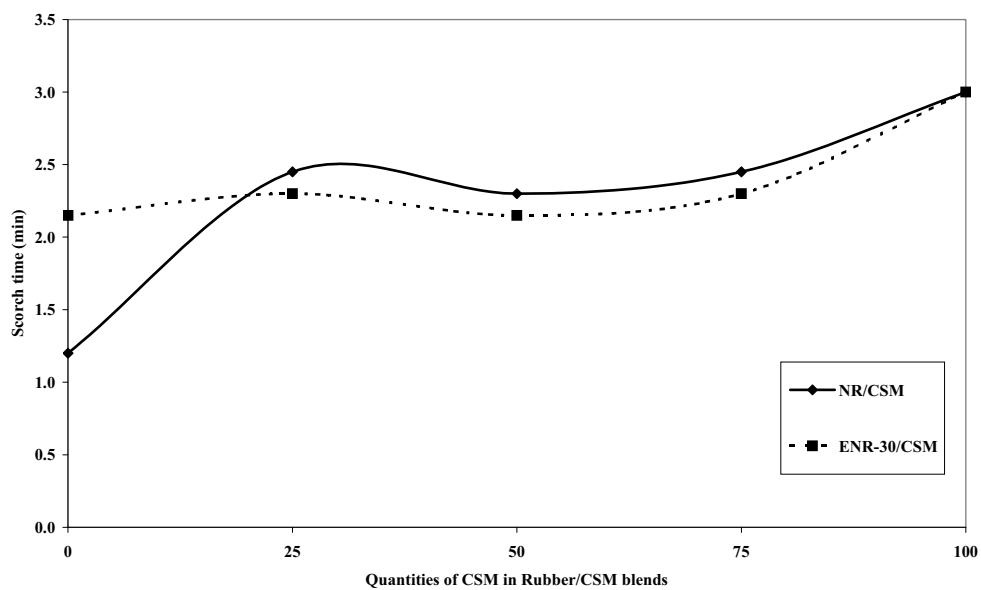
2.4 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์

2.4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์ต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์

ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/CSM และยางเบลนด์ ENR-30/CSM ที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO + DPTT) ดังสูตรในตารางที่ 2 ทดสอบโดยใช้เครื่อง ODR 100s ที่อุณหภูมิทดสอบ 160°C ตามหัวข้อที่ 1.8.4 ได้ลักษณะกราฟแสดงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ (Cure curve) ของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 39 นำข้อมูลที่ได้จากลักษณะการวัลคาไนซ์ มาวิเคราะห์ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 40 - 43

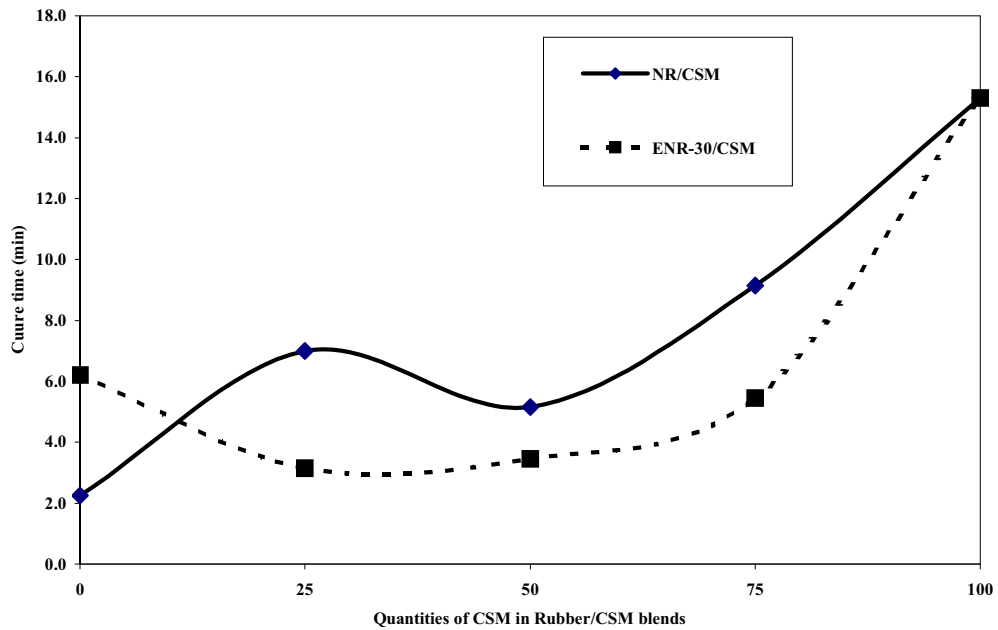


รูปที่ 39 ลักษณะการวัดค่าโมเมนต์ของยางเบลนด์ระหว่างยาง NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์



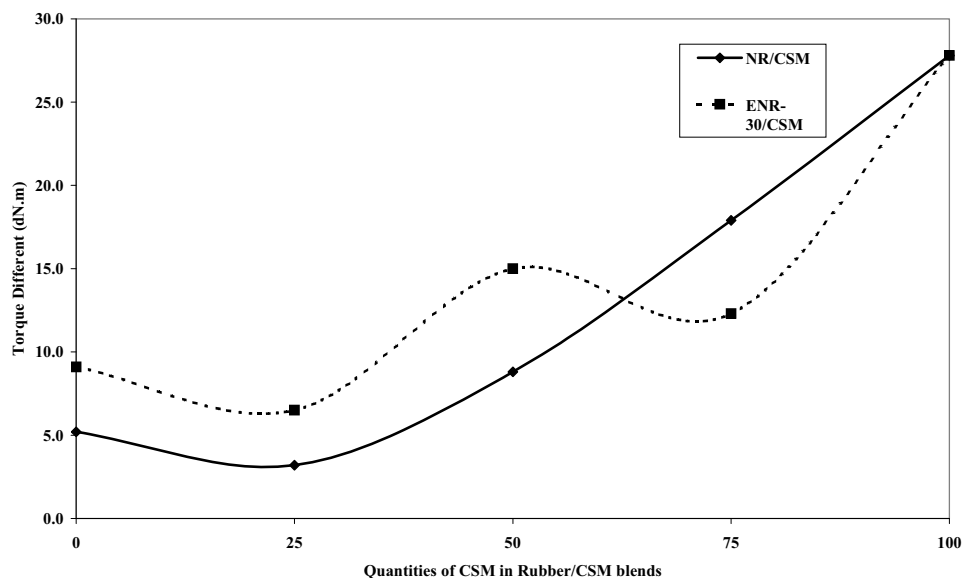
รูปที่ 40 ค่าเวลาสกอร์ชของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 40 พบว่า ค่าเวลาสกอร์ชหรือค่าเวลาที่สามารถขึ้นรูปของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณพันธะคู่ หรือความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาคัดค้าน้อยลง



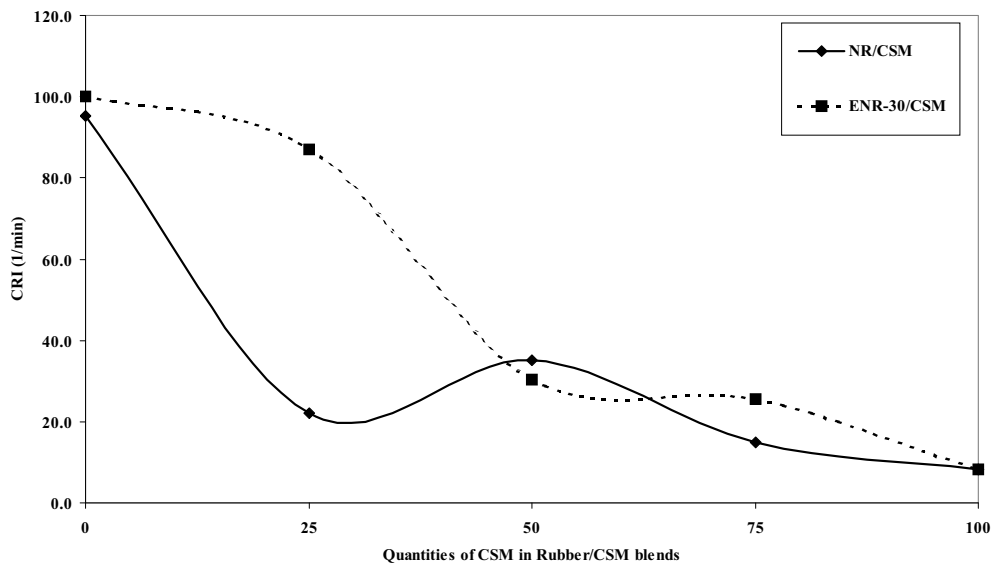
รูปที่ 41 ค่าเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 41 พบว่า เวลาการวัลคาไนซ์มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนด์มากขึ้น โดยที่ยางธรรมชาติเดี่ยวมีเวลาการวัลคาไนซ์ต่ำสุด ขณะที่การใช้อย่างคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเดี่ยวใช้เวลาในการวัลคาไนซ์มากที่สุด เนื่องจาก ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นยางมีขั้วทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบไอออนิก (Ionic crosslink) ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ได้ แต่ปฏิกิริยาเกิดได้ช้ากว่า ส่วนเวลาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์มีค่าเร็วที่สุด โดยจะเกิดพันธะเชื่อมโยงจากการใช้สารตัวเร่ง DPTT ซึ่งเป็นสารให้กำมะถัน (sulfur donor) เท่านั้นไม่เกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แต่ในยางธรรมชาติแมกนีเซียมออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นจึงให้เวลาการวัลคาไนซ์ที่เร็วที่สุด



รูปที่ 42 ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 42 พบว่า ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนด์มากขึ้น โดยสูตรยางที่ใช้ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเดียวให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดสูงที่สุด กล่าวได้ว่า ยางเบลนด์ ENR-30/CSM เกิดปริมาณพันธะเชื่อมดงได้มากกว่ายางเบลนด์ NR/CSM ส่วนในกรณียางเบลนด์ NR/CSM มีแนวโน้มให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดน้อยกว่ายางเบลนด์ของ ENR-30/CSM นั่นคือ ยางเบลนด์ระหว่าง ENR-30/CSM เกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงมากกว่ายางเบลนด์ NR/CSM ซึ่งเกิดพันธะเชื่อมโยงหรือแรงกระทำทางเคมีที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.3.2.1 (หน้า 33)



รูปที่ 43 อัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

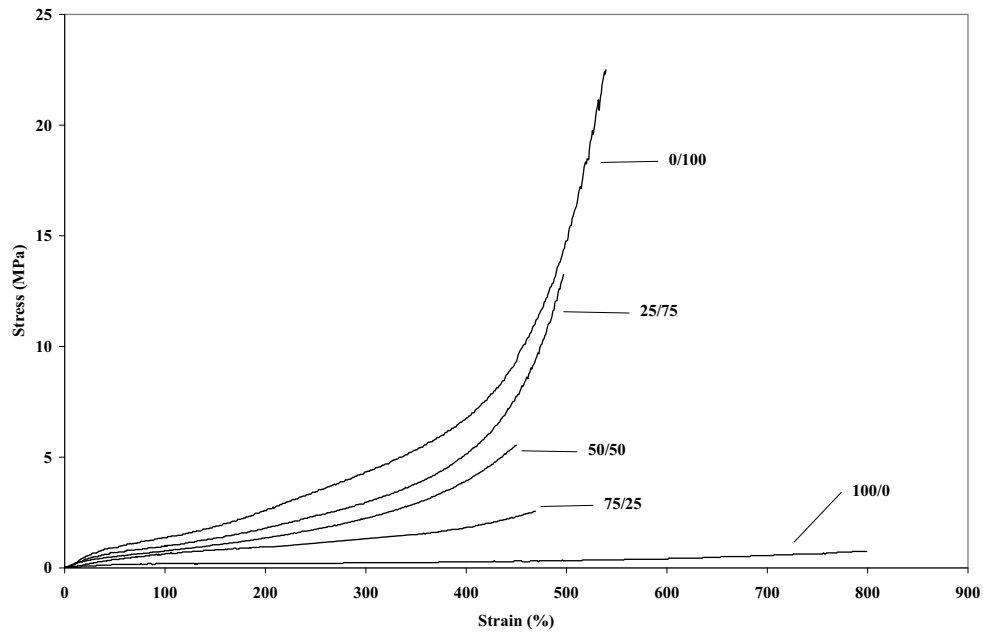
จากรูปที่ 43 พบว่า อัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมากขึ้น แสดงว่า ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ช้ากว่ายางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอพอคไซค์ โดยยางเบลนด์ ENR-30/CSM มีแนวโน้มของอัตราการวัลคาไนซ์สูงกว่า NR/CSM ทั้งนี้ เนื่องมาจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นนอกจากเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์จากสารวัลคาไนซ์แล้ว ยังเกิดจากแรงกระทำทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันบน โมเลกุลของยางทั้งสองชนิด

2.4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์ต่อสมบัติทางกายภาพ

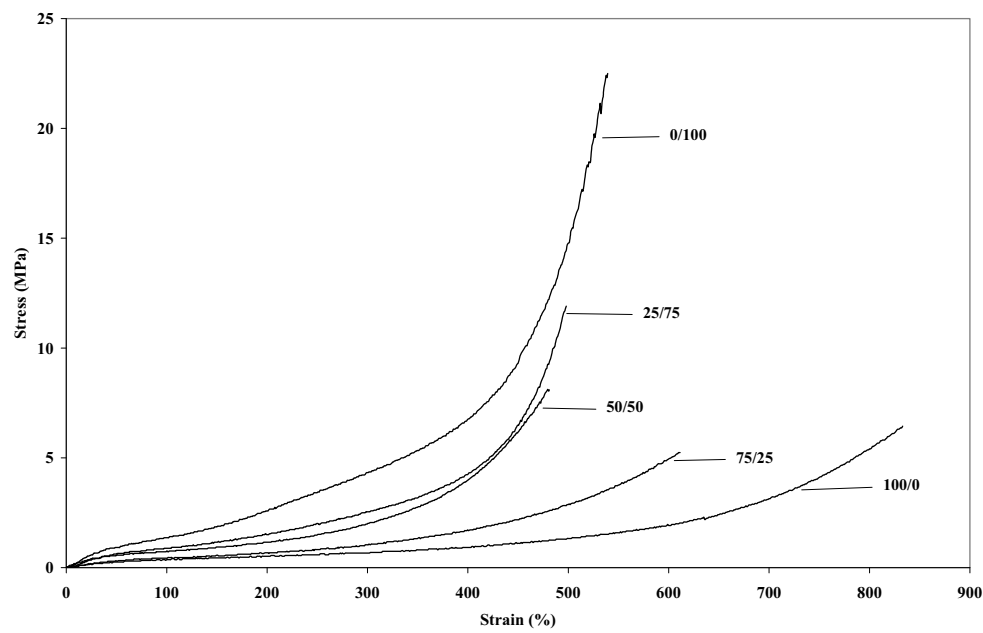
นำยางวัลคาไนซ์ที่ได้เตรียมได้จากการเบลนด์ NR0/CSM และ ENR-30/CSM ด้วยอัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก ตามหัวข้อที่ 1.4 ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพตามหัวข้อที่ 1.8.5 – 1.8.8 ได้ผลการทดลองดังนี้

2.4.2.1 ความต้านทานต่อแรงดึง

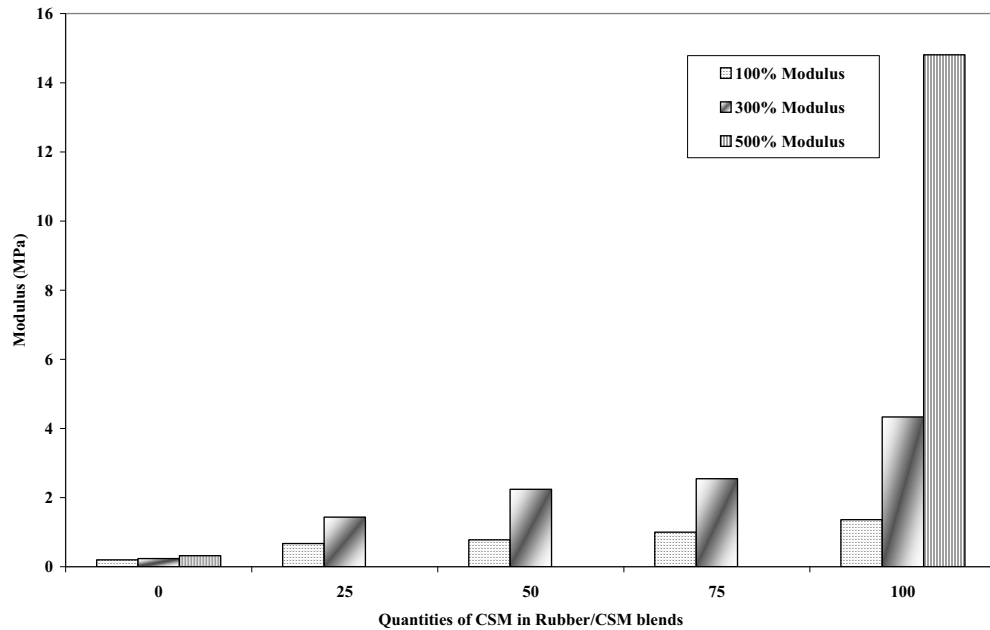
ทดสอบความทนทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ดังรูปที่ 44 - 45 ได้ข้อมูลค่าโมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ ดังรูปที่ 46 - 47 ความต้านทานต่อแรงดึง ดังรูปที่ 48 และความสามารถในการยืดจนขาดดังรูปที่ 49



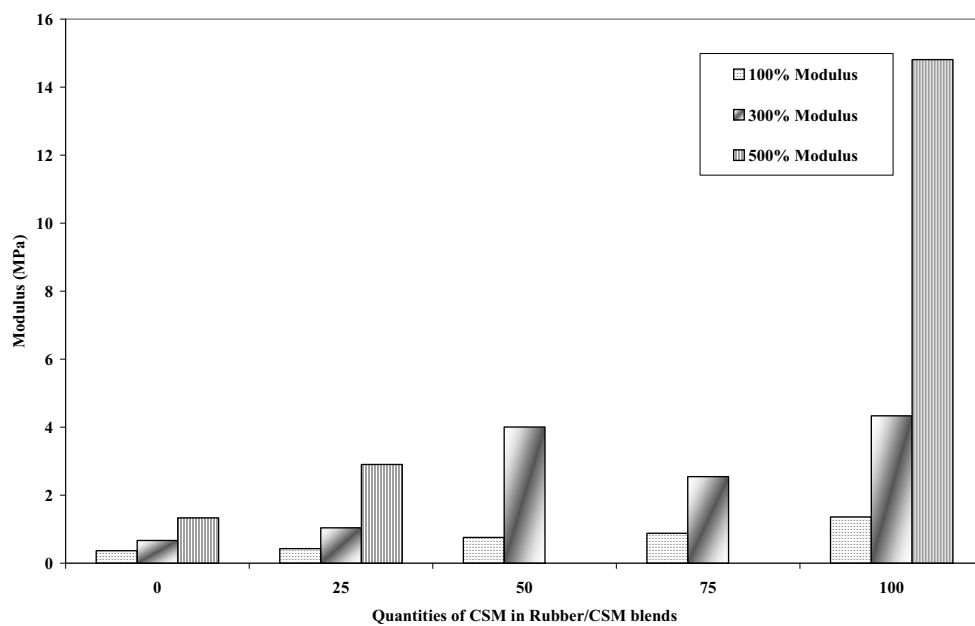
รูปที่ 44 Stress-strain curve ของยางเบลด NR/CSM ที่อัตราส่วนการเบลดต่างๆ



รูปที่ 45 Stress-strain curve ของยางเบลด ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนการเบลดต่างๆ

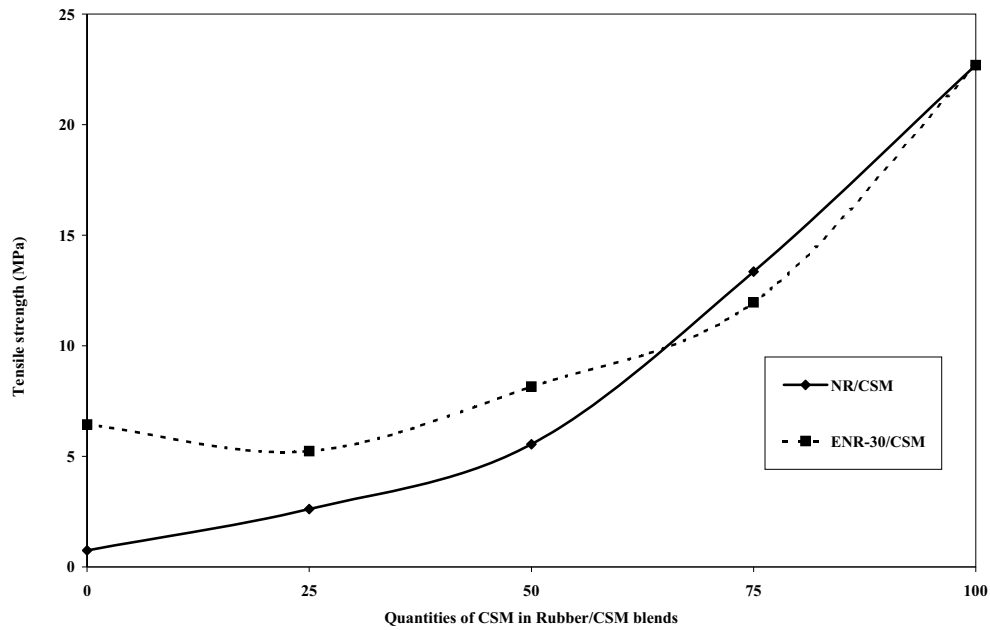


รูปที่ 46 ค่าโมดูลัส (Modulus) ที่เปอร์เซ็นต์การยัดต่างๆ ของยางเบลนด์ NR/CSM



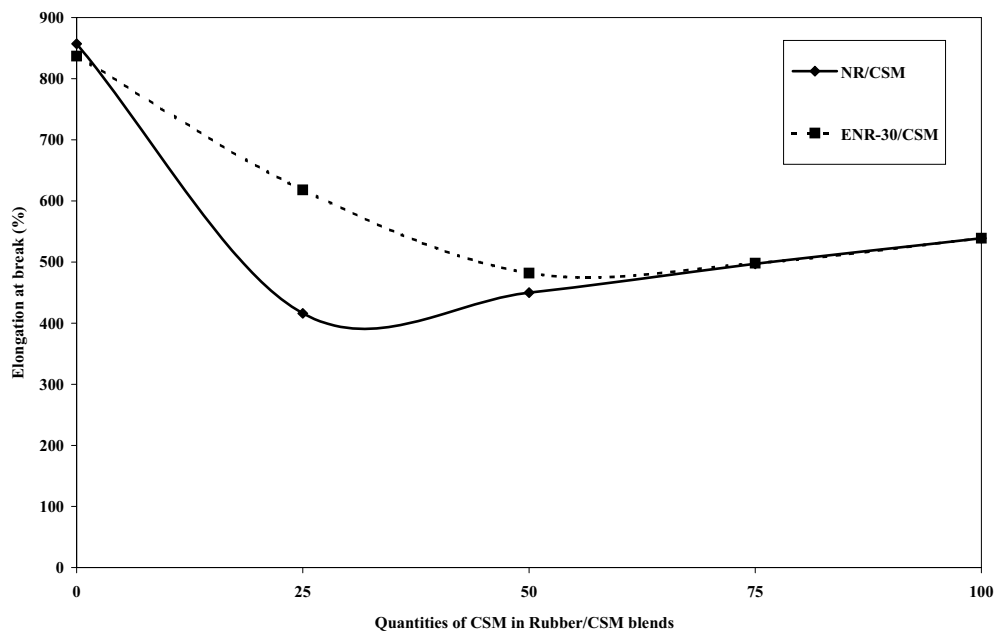
รูปที่ 47 ค่าโมดูลัส (Modulus) ที่เปอร์เซ็นต์การยัดต่างๆ ของยางเบลนด์ ENR-30/CSM

จากรูปที่ 46 - 47 เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า สูตรยางที่ใช้ยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนเดี่ยวให้ค่า 100, 300 และ 500 %โมดูลัส สูงที่สุด ทุกสัดส่วนการเบลนด์ โดยค่าโมดูลัสที่ระยาศัดต่างๆ มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนเป็นยางที่เกิดแรงดึงดูดหรือแรงกระทำทางเคมีภายในโมเลกุลสูง ทำให้มีความแข็งแรงมาก ในทำนองเดียวกันยางเบลนด์ ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสูตรยางที่ใช้ยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนเดี่ยวจะให้ค่า 100, 300 และ 500 %โมดูลัสสูงที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 48 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 48 พบว่า อัตราส่วนของยางเบลนด์มีผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงทั้งในกรณียางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนด์มากขึ้น แสดงให้เห็นว่า ยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนเกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงไคมากกว่า ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุด-ต่ำสุด ดังรูปที่ 42

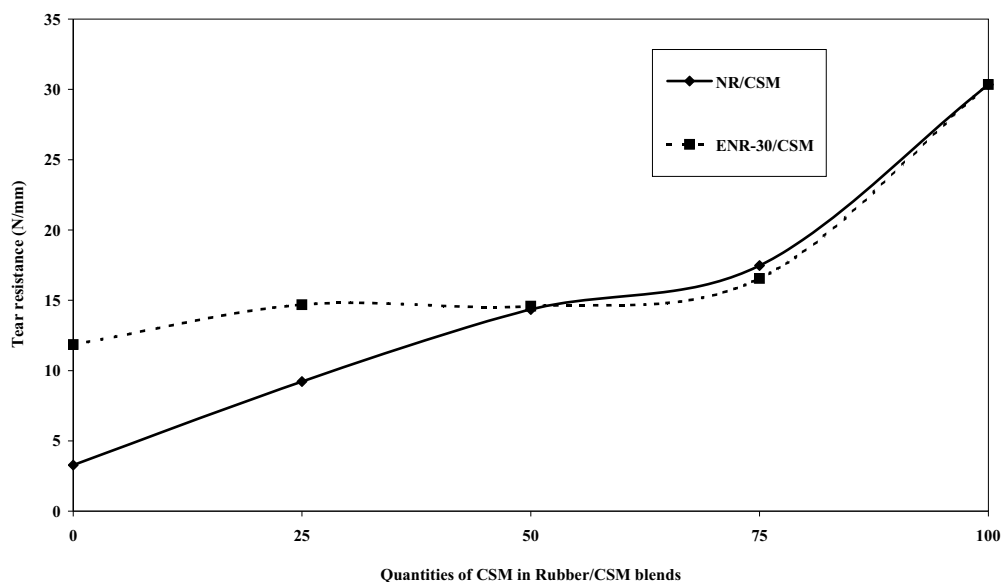


รูปที่ 49 ค่าความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 49 พบว่า อัตราส่วนในการเบลนด์มีผลต่อความสามารถในการยืดจนขาด ทั้งในกรณีของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยพบว่า เมื่อสัดส่วนของยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนด์มากขึ้นทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดลดลง และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้ยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนมากกว่า 50 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากในยางเบลนด์มีปริมาณยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR-30) น้อยลง ซึ่งยางดังกล่าวทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการยืดสูง หรือมีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีน

2.4.2.2 ความต้านทานการฉีกขาด

นำยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ และใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบแมกนีเซียมออกไซด์ มาทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 50

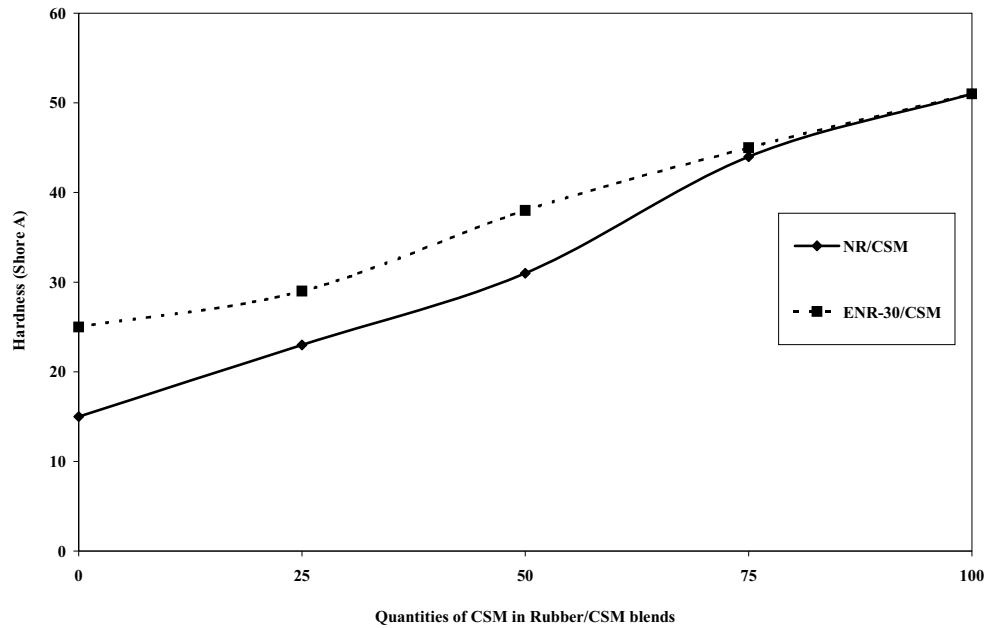


รูปที่ 50 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) ของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 50 พบว่า อัตราส่วนในการเบลนด์มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด ในกรณีของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยเมื่อสัดส่วนของยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนมากขึ้นทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น และในยางเบลนด์ ENR-30/CSM มีแนวโน้มความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่า NR/CSM เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีแรงดึงดูดภายในโมเลกุลสูงกว่ายางธรรมชาติ จึงทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่า

2.4.2.3 ความแข็ง

นำยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนด์ระหว่าง NR/CSM และ ENR-30/CSM โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ และใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบแมกนีเซียมออกไซด์ มาทดสอบความแข็ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 51

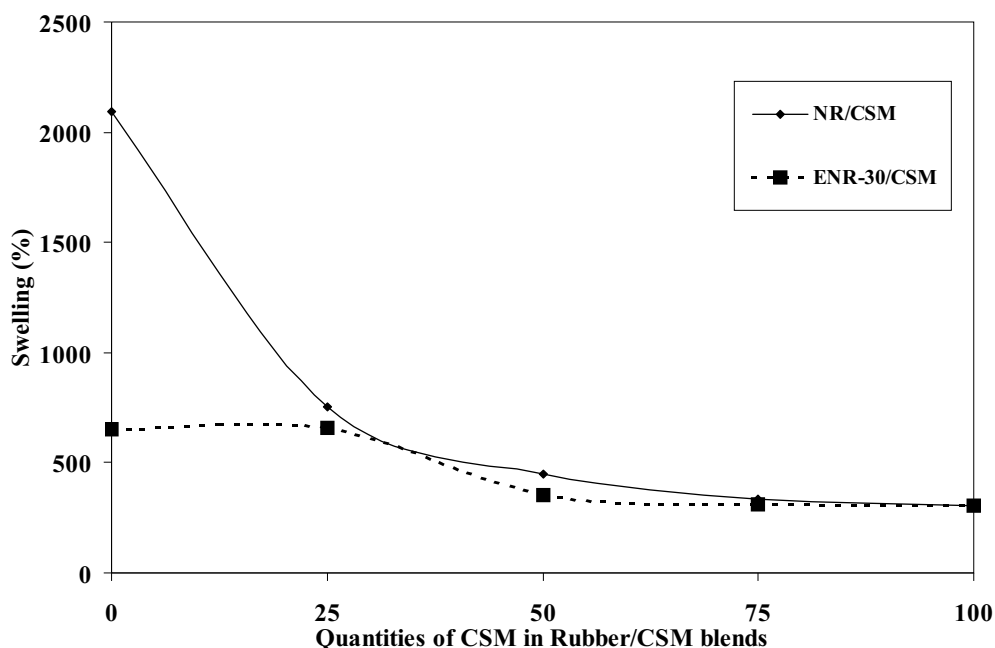


รูปที่ 51 ค่าความแข็งของยางเบลนด์ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 51 พบว่า ชนิดของยางเบลนด์มีผลต่อความแข็ง โดยที่ยางเบลนด์ ENR-30/CSM มีค่าความแข็งมากกว่า NR/CSM ทุกสัดส่วนการเบลนด์ โดยยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีหมู่อีพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่เพิ่มสภาพขั้วในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถเกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างกันได้ ทำให้อยางเบลนด์มีความแข็งมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้งยางเบลนด์ ENR-30/CSM และ NR/CSM มีความแข็งสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุดดังรูปที่ 42

2.4.2.4 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์ต่อสมบัติด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย

จากการทดสอบสมบัติด้านความทนทานต่อตัวทำละลายของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ ดังสูตรในตารางที่ 2 โดยแช่ในตัวทำละลายผสมระหว่างไอโซออกเทนกับโทลูอีน ในอัตราส่วน 50:50 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามหัวข้อที่ 1.8 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 52

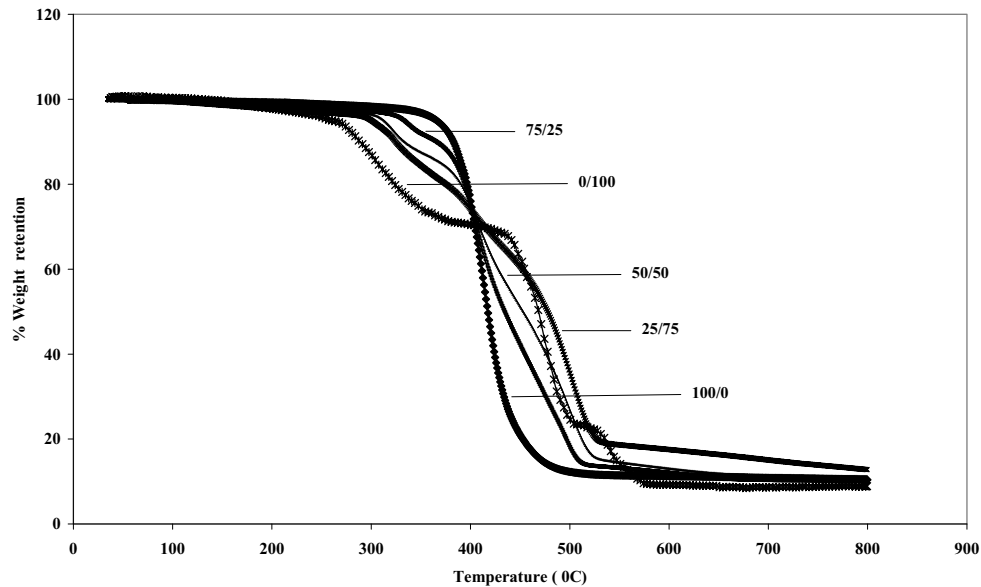


รูปที่ 52 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

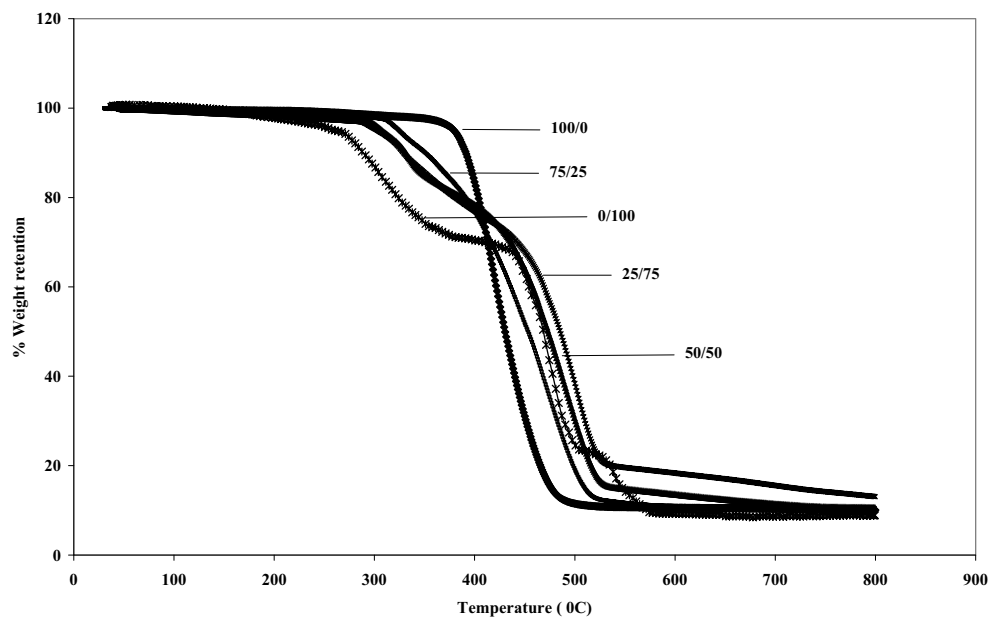
จากรูปที่ 52 เป็นความสัมพันธ์ของการบวมพองของยางวัลคาไนซ์กับสัดส่วนในการเบลนด์ โดยพบว่า ความต้านทานต่อการบวมพองสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมากขึ้น โดยยางเบลนด์ NR/CSM จะมีเปอร์เซ็นต์การบวมพองสูงกว่า ENR-30/CSM ในทุกสัดส่วนการเบลนด์ ซึ่งสูตรยางที่ใช้ยางธรรมชาติ หรือยางธรรมชาติพอกไซค์เดี่ยวๆ หรือที่สัดส่วน 100/0 % โดยน้ำหนัก มีเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 % โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากนี้จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางเบลนด์ NR/CSM สูงกว่ายางเบลนด์ ENR-30/CSM เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่และเป็นโมเลกุลที่ไม่มีความเป็นขั้วทำให้เกิดการบวมพองในตัวทำละลายไม่มีขั้วได้มากกว่ายางธรรมชาติพอกไซค์ซึ่งมีหมู่พอกไซค์ที่แสดงความเป็นขั้วเกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุล

2.4.2.5 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของยางเบลนด์จากยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติพอกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเมกนีเซียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ตามหัวข้อที่ 1.8.9 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 53 – 54 นำข้อมูลอุณหภูมิการสลายตัวครั้งที่ 1 (First decomposition temperature, Td₁) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการเบลนด์ได้ดังรูปที่ 55



รูปที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20°C/mm

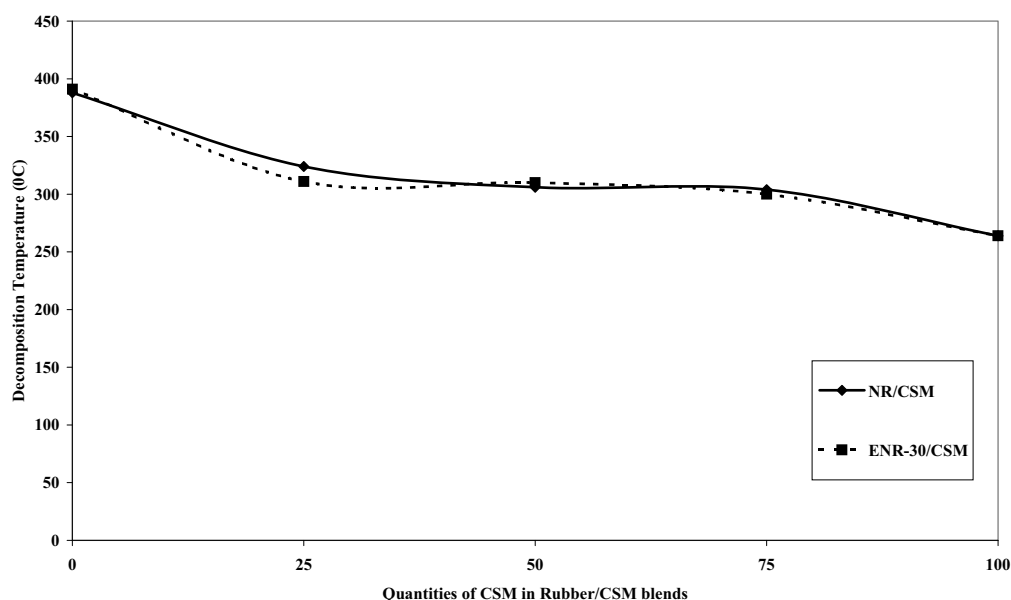


รูปที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของยางเบลนด์ระหว่าง ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20°C/mm

จากรูปที่ 53 – 54 พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์เดี่ยวๆมีเพียงค่าเดียว แต่กรณีของยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอทิลีนเดี่ยวๆ มีอุณหภูมิการสลายตัว 2 จุด ซึ่ง T_{d1} อาจจะเป็นการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันคือ หมู่ซัลโฟนิลคลอไรด์ และคลอรีน เป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือกรดไฮโดรคลอริก ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวครั้งที่ 2 (Second decomposition temperature, T_{d2}) เป็นการสลายตัวของพันธะโควาเลนต์ในโครงสร้าง

ของโมเลกุลยางยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ส่วนยางเบลนดระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอพอคไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน จะมีอุณหภูมิการสลายตัว 2 จุด

จากรูปที่ 4.57-4.58 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ของยางเบลนดที่สัดส่วนการเบลนดต่างๆ จากอุณหภูมิที่มีอัตราการหายไปของน้ำหนักสูงสุดครั้งที่ 1 (T_{d1}) ได้ข้อมูลดังรูปที่ 55

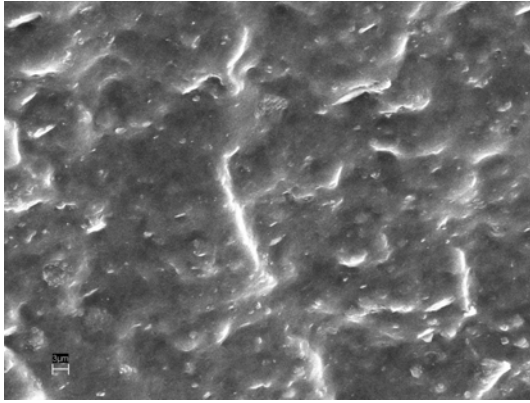


รูปที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_{d1}) ของยางเบลนดที่อัตราส่วนการเบลนดต่างๆ

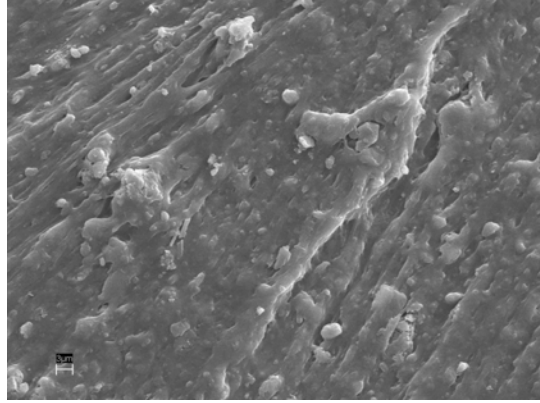
จากรูปที่ 55 พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด (T_{d1}) ลดลงตามปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนขั้นที่ 1 (T_{d1}) มีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอคไซค์ และนอกจากนี้ ยังพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติอพอคไซค์ เนื่องจากยางธรรมชาติอพอคไซค์มีโครงสร้างของหมู่เอพอกไซด์ที่แสดงความเป็นขั้วอยู่ในโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของมันเอง ส่งผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของยางสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 2 (T_{d2}) พบว่า การเพิ่มปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนทำให้ค่า T_{d2} เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาทั้งกระบวนการในการเผาไหม้จะเห็นว่า การเพิ่มยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ทำใหยางเบลนดดังกล่าวทนความร้อนมากยิ่งขึ้น

2.4.2.6 อิทธิพลของอัตราส่วนในการเบลนดต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา

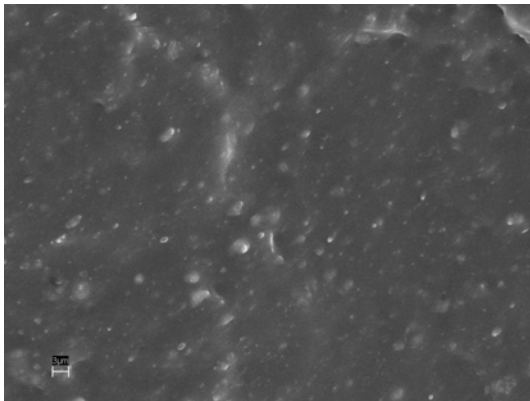
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนดระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอพอคไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยระบบแมกนีเซียมออกไซด์ โดยเตรียมขึ้นตัวอย่างได้ตามหัวข้อที่ 1.8.10 นำไปส่องด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 56 - 57



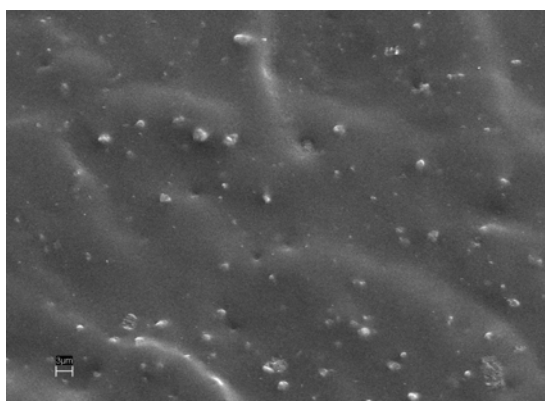
CSM



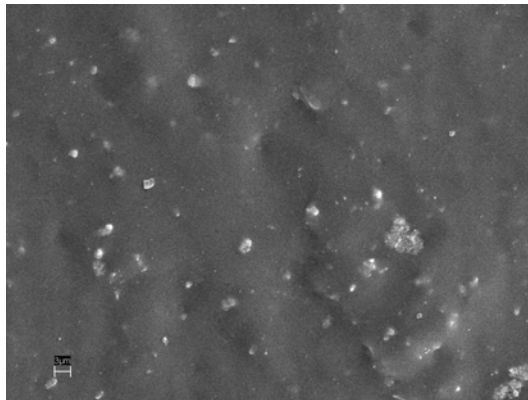
NR/CSM 25/75



NR/CSM 50/50

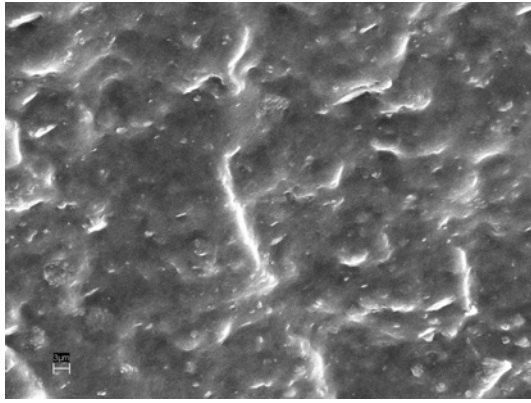


NR/CSM 75/25

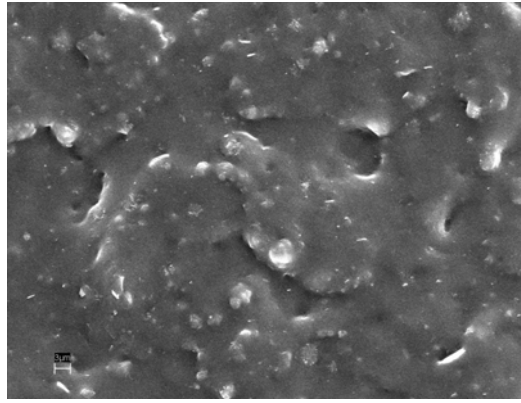


NR

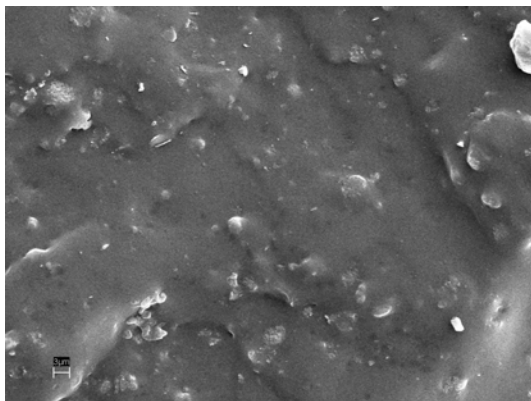
รูปที่ 56 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางเบลดระหว่าง NR/CSM ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยกำลังขยาย 1,000 เท่า



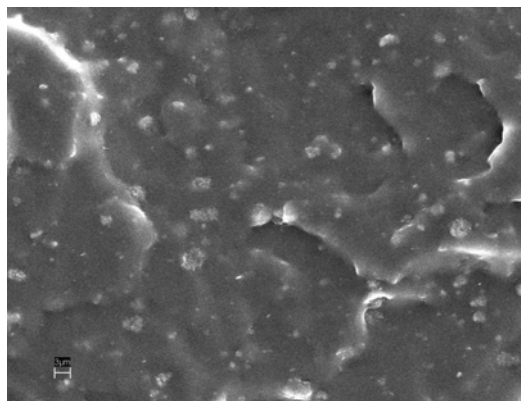
CSM



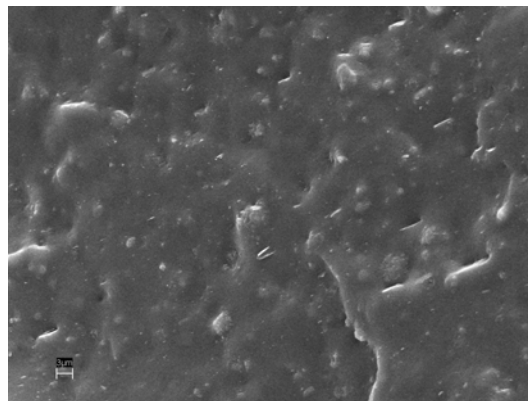
ENR-30/CSM 25/75



ENR-30/CSM 50/50



ENR-30/CSM 75/25



ENR-30

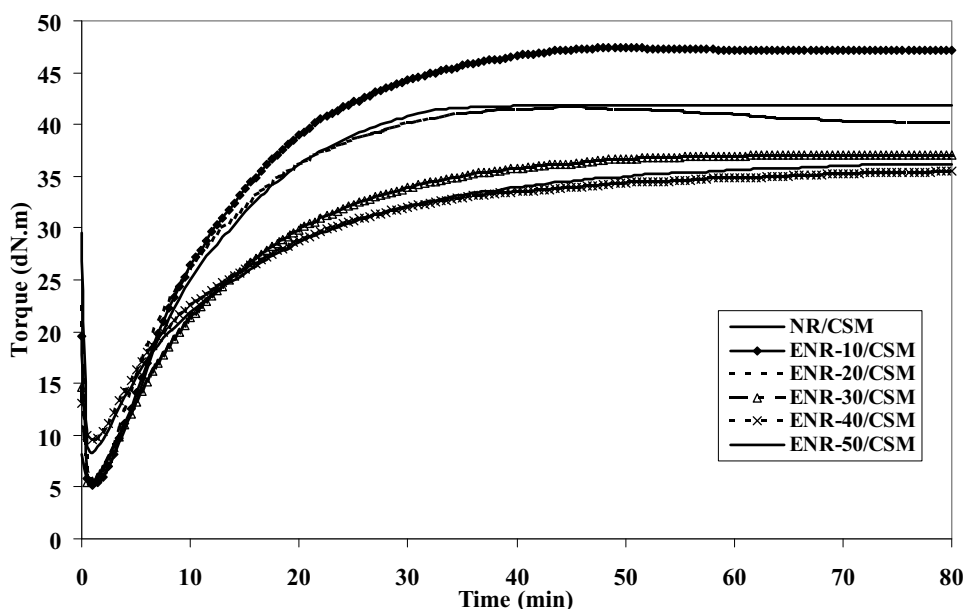
รูปที่ 57 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางเบลนด์ระหว่าง ENR-30/CSM ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยกำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 56 - 57 เมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในยางเบลนด์ พบว่า ลักษณะของผิวหน้าตัดของยางเบลนด์มีความเรียบมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งในกรณีของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR-30/CSM เนื่องจากเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ยางเบลนด์เป็นเนื้อเดียวกันของทั้งสองเฟสมากขึ้น โดยเฉพาะสัดส่วนของยางเบลนด์เท่ากับ 50/50 และ 75/25 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากยางทั้ง 3 ชนิด ได้ปรับความหนืดให้มีค่าใกล้เคียงกัน

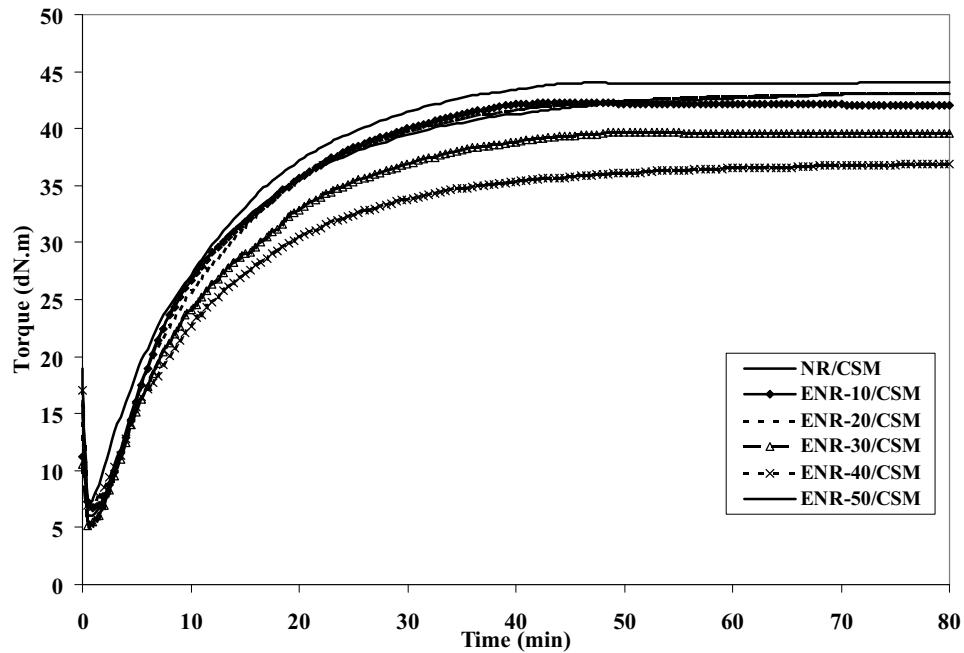
2.5 อิทธิพลของปริมาณหม้อฟอกไซค์

2.5.1 อิทธิพลของปริมาณหม้อฟอกไซค์ ต่อสมบัติในการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์

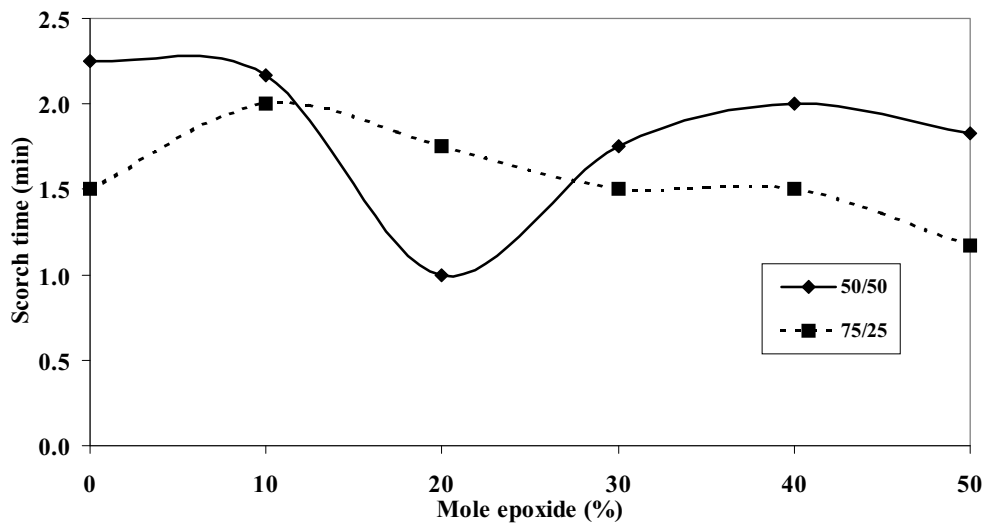
ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/CSM และ ENR/CSM โดยแปรชนิดของยางธรรมชาติฟอกไซค์ ที่มีปริมาณหม้อฟอกไซค์เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ ENR-10, ENR-20, ENR-30, ENR-40, ENR-50 โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบผสม (Mixed system) โดยใช้สารวัลคาไนซ์ร่วมระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ กับเปอร์ออกไซด์ ดังสูตรในตารางที่ 2 (เนื่องจากในการเบลนด์ยางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบแมกนีเซียมออกไซด์ทำให้ยางเบลนด์ของ NR/CSM แปรรูปโดยการอัดเข้าได้ยาก) จึงเปลี่ยนระบบการวัลคาไนซ์เป็นแบบผสม (Mixed system) โดยเลือกศึกษาที่อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 และ 75/25 % โดยน้ำหนัก ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่อง ODR 100s ที่อุณหภูมิทดสอบ 160 °C ตามหัวข้อที่ 1.8.4 ได้ลักษณะกราฟแสดงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ (Cure curve) ของยาง เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 58 - 59 นำข้อมูลที่ได้จากลักษณะการวัลคาไนซ์ มาวิเคราะห์ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 60 – 63



รูปที่ 58 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยาง NR/CSM และ ENR/CSM ที่อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณหม้อฟอกไซค์

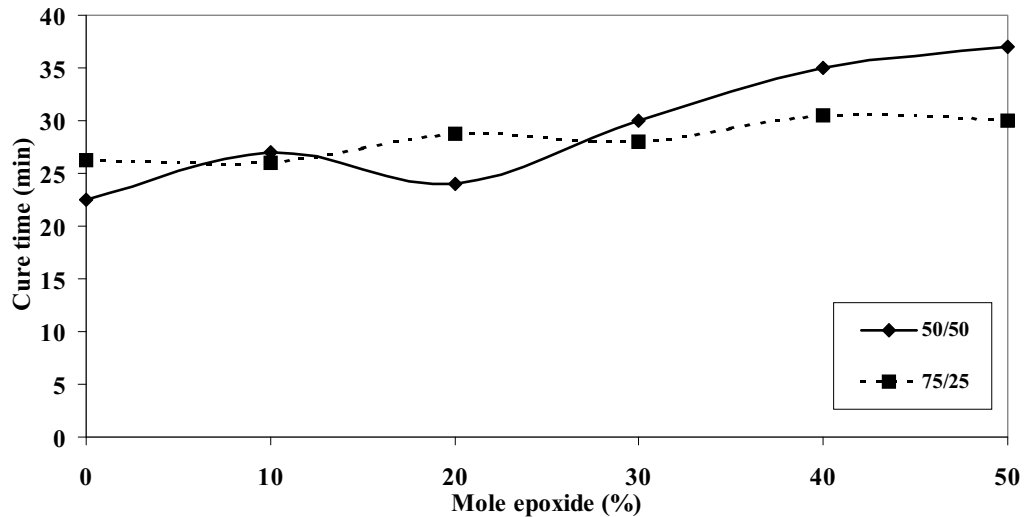


รูปที่ 59 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยาง NR/CSM ที่อัตราส่วน 75/25 % โดยน้ำหนัก โดยแปรรูปการวัลคาไนซ์



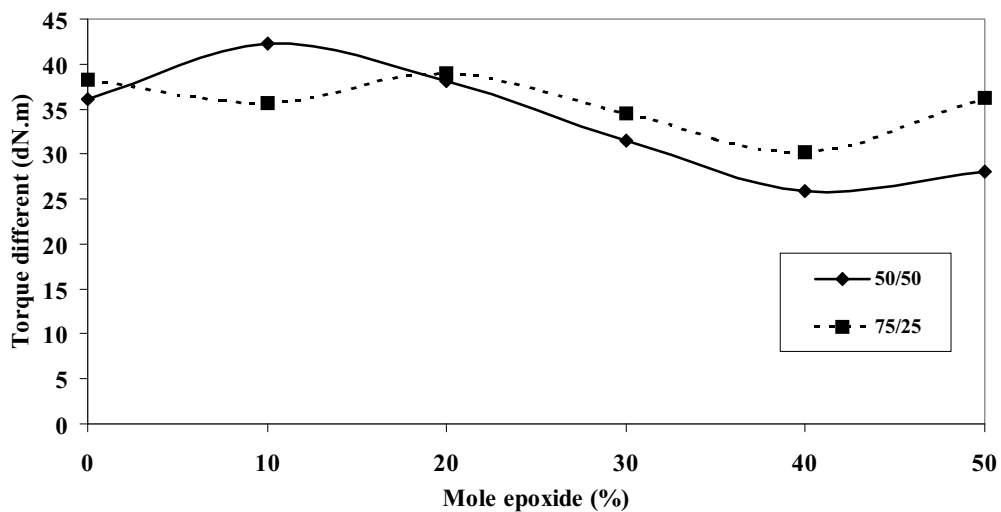
รูปที่ 60 ค่าเวลาสกอร์ชของยางเบลนด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 60 พบว่า ค่าเวลาสกอร์ชหรือค่าเวลาที่สามารถขึ้นรูปของยางเบลนด์ ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ระหว่าง 0-50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราส่วนในการเบลนด์ 50/50 % โดยน้ำหนัก มีค่าเวลาสกอร์ชใกล้เคียงกันคือ อยู่ในช่วง 1-2 นาที ในขณะที่อัตราส่วนในการเบลนด์ 75/25 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มของค่าเวลาสกอร์ชลดลงเมื่อมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่า 10 โมลเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 61 ค่าเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 61 พบว่า เวลาการวัลคาไนซ์มีค่าสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากขึ้น เนื่องจากความว่องไวของพันธะคู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่า และเมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณพันธะคู่ลดลง ส่งผลให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ลดลงตามลำดับ



รูปที่ 62 ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุด ของยางเบลนด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 62 พบว่า ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุด มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้น้อยและมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งในกรณียางเบลนด์อัตราส่วน 50/50 และ 75/25 % โดยน้ำหนัก