



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การเตรียมและสมบัติของยางผสมสารตัวเติมระหว่างน้ำยาง
ธรรมชาติอีพอกไซด์กับดิสเพอร์ชันของสารตัวเติมเคลย์

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีว์ ชัน แกสมาน และคณะ

สิงหาคม 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและสมบัติของยางผสมสารตัวเติมระหว่างน้ำยางธรรมชาติพอกไซค์กับ
ดิสเพอร์ชั่นของสารตัวเติมเคลย์

คณะผู้วิจัย	สังกัด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีวัน แกสมาน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
นางสาวจิตรลดา สาแหละ	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	4
บทสรุปของผู้บริหาร	5
2. วิธีการทดลอง	7
2.1 การเตรียมยางธรรมชาติโอพอกไซค์จากน้ำยางธรรมชาติชั้น	7
2.2 การเตรียมดิสเพอร์ชันเซลล์	7
2.3 การผสมน้ำยางกับดิสเพอร์ชันเซลล์	8
2.4 การผสมยางกับสารตัวเติมเซลล์ในสถานะแห้ง	8
2.5 สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติโอพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเซลล์	9
2.6 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	10
2.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ	11
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	15
3.1 การเตรียมยางธรรมชาติโอพอกไซค์จากน้ำยางธรรมชาติชั้น	15
3.2 การเตรียมดิสเพอร์ชันเซลล์	16
3.3 สมบัติของยางธรรมชาติโอพอกไซค์	19
3.4 สมบัติของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติโอพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเซลล์	22
3.5 การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติโอพอกไซค์ผสมสารเคมี	27
3.6 เปรียบเทียบการผสมสารตัวเติมเซลล์ในสถานะแห้งและสถานะน้ำยาง	51
4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
5. เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	74

การเตรียมและสมบัติของยางผสมสารตัวเติมระหว่างน้ำยางธรรมชาติโอพอกไซค์กับ ดิสเพอร์ชันของสารตัวเติมเคลย์

บทคัดย่อ

เตรียมยางธรรมชาติโอพอกไซค์จากปฏิกิริยาโอพอกซิเดชันของกรดพอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซค์กับน้ำยางธรรมชาติ พบว่า ปริมาณหมู่โอพอกไซค์ในโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยาโอพอกซิเดชัน และเตรียมสารตัวเติมเคลย์กระจายตัวในน้ำให้มีความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการผสมสารตัวเติมเคลย์ในยางธรรมชาติโอพอกไซค์ในสภาวะลาเทกซ์และสภาวะแห้ง แล้วศึกษาสมบัติด้านการไหล สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติด้านความทนทานต่อการบวมพอง และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่ได้ พบว่า ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติโอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่โอพอกไซค์ต่าง ๆ มีค่าความหนืดมูนี [ML(1+4), 125°C] ความเค้นฉีก ความหนืดฉีก เวลาการวัลคาไนซ์ โมดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความต้านทานต่อการบวมพองเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่โอพอกไซค์บนโมเลกุลยางธรรมชาติและปริมาณสารตัวเติมเคลย์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติด้านความสามารถในการยืดหรือระยะยืดจนขาดของยางจะลดลง สมบัติหลังการบ่มแรงของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติโอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่โอพอกไซค์ต่างๆ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ พบว่า ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สมบัติด้านความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดจนขาดของยางมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการผสมสารตัวเติมเคลย์ในสภาวะลาเทกซ์และสภาวะแห้ง พบว่า การผสมในสภาวะลาเทกซ์ทำให้ยางมีสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับการผสมในสภาวะแห้ง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติโอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่โอพอกไซค์ต่างๆ โดยแปรปริมาณสารตัวเติมเคลย์ และแปรสภาวะในการผสมคือ สภาวะลาเทกซ์และสภาวะแห้ง พบว่า ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติโอพอกไซค์ที่ผสมสารตัวเติมเคลย์ดังกล่าวมีการกระจายตัวของสารตัวเติมเคลย์ในยางอย่างสม่ำเสมอ

Preparation and Properties of filled rubber masterbatch from ENR latex and clay dispersion

Abstract

Epoxidized natural rubber was prepared by *in-situ* epoxidation reaction using formic acid and hydrogen peroxide. The results found that quantity of the epoxide groups on natural rubber molecules increased with increasing reaction time. Clay dispersion (40% w/w) was prepared by stirring in water and later mixed with epoxidized natural rubber in latex state. Rheological properties (i.e., Mooney viscosity relationship between shear stress, shear viscosity vs. shear rate), curing properties, physical properties, swelling resistant and morphological properties. It was found that mooney viscosity [ML(1+4), 125°C], shear stress, shear viscosity, cure time, 100, 300 and 500 % modulus, tensile strength, tear strength. Hardness and swelling resistant increased with the increase of clay and epoxide level in the molecules, while elongation at break (%) decreased. Ageing properties it found that 100, 300 and 500 % modulus and tear strength of NR and ENR was higher but tensile strength and elongation at break (%) was lower. When was adding dispersion clay in NR or ENR latex and powder clay in dry NR or ENR latex. It was found that dispersion clay gave nearly vulcanization and physical properties than powder clay. The morphological properties of natural rubber and epoxidized natural rubber which had difference of type of clay, quantity of epoxidized function and quantity of clay it found that dispersion clay and powder clay could well dispersed in rubber phase.

หน้าสรุปโครงการ

- ชื่อโครงการ** การเตรียมและสมบัติของยางผสมสารตัวเติมระหว่างน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับ
ดิสเพอร์ชันของสารตัวเติมเคลย์
คำสำคัญ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์, สารตัวเติม, เคลย์, ดิสเพอร์ชัน
Research title Preparation and Properties of filled rubber masterbatch from ENR latex and clay
dispersion
keywords Epoxidized natural rubber, Filler, Clay, Dispersion
- ชื่อหัวหน้าโครงการ** หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail
ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์อาชีวิน แกสมาน
หน่วยงาน ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1866 / 0-7333-1099
E-mail kazon@bunga.pn.psu.ac.th
- นักศึกษาหรือนักวิจัย** หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail
ชื่อ - สกุล นางสาวจิตรลดา สาเหละ
หน่วยงาน ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1866 / 0-7333-1099
E-mail S4445054@mor-or.pn.psu.ac.th
- 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
- ได้เสนอโครงการนี้ หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งอื่นที่ใดบ้าง
☐ ไม่เสนอต่อแหล่งทุนอื่น
- ระยะเวลาดำเนินงาน 6 เดือน

7. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ สร้างรายได้ในรูปแบบต่างๆ ทั้งการส่งออกในรูปแบบของยางดิบ หรือการใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ โดยการใช้ยางธรรมชาติในประเทศส่วนใหญ่เป็นการใช้งานทางตรง กล่าวคือ เป็นการนำยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆ แล้วขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ หรืออาจจะมีการผสมกับยางสังเคราะห์เพื่อเสริมคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่มีในยางธรรมชาติ เช่น ผสมกับยาง EPDM เพื่อเพิ่มความสามารถในการทนต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นและความต้านทานต่อโอโซน เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงโครงสร้างเพื่อให้ได้อนุพันธ์ของยางธรรมชาติที่มีสมบัติบางประการดีขึ้น ทำให้มีโอกาสที่จะแข่งขันการใช้งานกับยางสังเคราะห์ที่ใช้งานเฉพาะด้านได้ เช่น การดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อน้ำมัน (swelling resistance) และความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (permeability) เพื่อเสริมสมบัติบางประการให้เด่นมากยิ่งขึ้น และพัฒนาความสามารถในการแปรรูป (processability) ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโครงสร้างผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) (Ishiaku, *et al.*, 1998 และ Mousa, *et al.*, 2000) เป็นต้น แนวทางในการศึกษาส่วนใหญ่จะผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับสารเคมีหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ด้วยเครื่องจักรในสถานะแห้ง (Dry mixing) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของยางและสารเคมีต่างๆ ที่ดี นอกจากนี้เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นและเกิดแรงกระทำระหว่างสารตัวเดิมกับยางชนิดต่างๆ อาจจำเป็นต้องใช้สารเคมีช่วยผสม (Processing aids) หรือสารเชื่อมต่อ (Coupling agents) (Alkadasi *et al.*, 2004) ได้มีการศึกษาวิจัยสมบัติและโครงสร้างยางชนิดต่างๆ ผสมสารตัวเดิมประเภทเคลย์ เช่น ยางไนไตรล์ผสมสารตัวเดิมเคลย์ (Wu, *et al.*, 2003) ยางธรรมชาติผสมสารตัวเดิมซิลิเกตที่มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ (layered silicate) (Varghese and Kocsis, 2003) ยางธรรมชาติผสมสารตัวเดิม Montmorillonite ที่ปรับปรุงโครงสร้าง (Magaraphan *et al.*, 2003) เป็นต้น

นอกจากนี้จากปัญหาที่เกิดขึ้นในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ระหว่างการจัดเก็บ เช่น การดูดความชื้นในอากาศ ทำใหยางชนิดนี้มีความชื้นสูง ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน รวมทั้งการเปิดของวงแหวนอีพอกไซด์ (Epoxide ring) ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทำใหยางชนิดนี้ไม่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่จากโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีขั้ว ส่วนสารตัวเดิมประเภทเคลย์จัดเป็นสารตัวเดิมอนินทรีย์ ที่ผิวอนุภาคมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups) ซึ่งมีความเป็นขั้วเช่นเดียวกัน คาดว่าหมู่ฟังก์ชันทั้งสองสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกัน ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารตัวเดิมเคลย์มีสมบัติที่ดีขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับสารตัวเดิมเคลย์ โดยผสมในสถานะน้ำยางหรือลาเท็กซ์ และเตรียมสารตัวเดิมเคลย์ให้อยู่ในรูปของคิสเพอร์ซัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดพลังงานในการผสม (เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผสมในสถานะยางแห้ง) รวมทั้งคาดว่า สามารถลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการจับตัวของน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ลงได้ จากงานวิจัยจะได้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับ

การเตรียมและสมบัติด้านต่างๆของยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์ รวมทั้งอาจลดปัญหาการดูดความชื้นของยางธรรมชาติพอกไซค์ลงได้

8. วัตถุประสงค์

- ศึกษาขั้นตอนและวิธีการเตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์ในสถานะน้ำยาง (Latex mixing)
- เพื่อศึกษาสมบัติการไหลของยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ การผสมในสถานะแห้ง (Dry mixing)
- เพื่อศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติของยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์

9. ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการเตรียมยางผสมจากยางธรรมชาติพอกไซค์กับคิสเปอร์ชั้นของสารตัวเติมเคลย์ในสถานะที่มีตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยการแปรปริมาณโมลพอกไซค์ในยางธรรมชาติพอกไซค์คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ และแปรปริมาณของเคลย์ดังนี้คือ 0, 25, 50, 100, 150 และ 200 phr โดยศึกษาพฤติกรรมกำหนัดหรือการสูญเสียสภาพของน้ำยางธรรมชาติพอกไซค์ หลังจากนั้นทดสอบสมบัติการไหลของยางผสมที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Mooney viscometer, Rosand capillary rheometer นำยางดังกล่าวที่เตรียมได้ผสมกับสารเคมีชนิดอื่นๆ เช่น สารตัวเร่ง สารกระตุ้น และกำมะถัน เป็นต้น ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพ เช่น โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดสูงสุด ความแข็ง และความทนทานต่อการฉีกขาด เป็นต้น รวมทั้งศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่ได้ การวิจัยจะทดลองเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติพอกไซค์ที่ผสมในสถานะแห้งบนลูกกลิ้ง

10. ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Output)

- ได้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการเตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์ โดยการผสมในสถานะลาเทกซ์
- ทราบสมบัติสมบัติด้านการไหล สมบัติด้านการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์
- สามารถลดพลังงานหรือระยะเวลาในการผสมยางกับสารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมยางกับสารตัวเติมบนลูกกลิ้ง
- ได้ยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์ในรูปของมาสเตอร์แบทช์ที่พร้อมใช้งานในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทนน้ำมัน เช่น พื้นรองเท้าทนน้ำมัน ท่อทนน้ำมัน เป็นต้น

11. แนวทางการดำเนินงานวิจัย

สมมุติฐานการวิจัย	วิธีการวิจัย
การพัฒนาอย่างผสมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารตัวเติมเคลย์ในสภาน้ำยาง	เตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีโมลอีพอกไซด์ระดับต่างๆคือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซนต์ และเตรียมคิสเพอร์ชั่นของสารตัวเติมเคลย์
	ผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับสารตัวเติมเคลย์ในสภาน้ำยางที่กึ่ง โดยแปรปริมาณเคลย์ดังนี้คือ 0, 25, 50, 100, 150 และ 200 phr จับตัวด้วยความร้อนหรือสารเคมี ล้าง ริดเป็นแผ่น และอบแห้งโดยศึกษาเปรียบเทียบยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมกับสารตัวเติมเคลย์ในปริมาณดังกล่าวและผสมบนเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง
	ทดสอบสมบัติการไหลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมเคลย์ทั้ง 2 แบบ (ผสมในน้ำยางและบนลูกกลิ้ง) โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer และ Rosand capillary rheometer
	เตรียมเป็นยางคอมปอนด์โดยผสมกับสารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่ง สารกระตุ้น ตามสูตรมาตรฐาน ASTM D3184 (โดยศึกษาเปรียบเทียบทั้งในกรณีผสมในสภาน้ำยางและผสมบนเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง) ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา
	วิเคราะห์ผล สรุป จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

บทสรุปของผู้บริหาร (Executive Summary)

การดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อน้ำมัน (swelling resistance) และความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (permeability) เพื่อเสริมสมบัติบางประการให้เด่นมากยิ่งขึ้น และพัฒนาความสามารถในการแปรรูป (processability) ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโครงสร้างผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น แนวทางการศึกษาส่วนใหญ่จะผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับสารเคมีหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ด้วยเครื่องจักรในสถานะแห้ง (Dry mixing) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของยางและสารเคมีต่างๆที่ดี นอกจากนี้เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นและเกิดแรงกระทำระหว่างสารตัวเติมกับยางชนิดต่างๆ อาจจำเป็นต้องใช้สารเคมีช่วยผสม (Processing aids) หรือสารเชื่อมต่อ (Coupling agents) จากปัญหาที่เกิดขึ้นของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ระหว่างการจัดเก็บ เช่น การดูดความชื้นในอากาศ ทำใหยางชนิดนี้มีความชื้นสูง ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน รวมทั้งการเปิดของวงแหวนอีพอกไซด์ (Epoxide ring) ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทำใหยางชนิดนี้ไม่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่จากโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีขั้ว ส่วนสารตัวเติมประเภทเคลย์จัดเป็นสารตัวเติมนินทรีย์ ที่ผิวอนุภาคมีหมู่ซิลานอล (Silanol groups) ซึ่งมีความเป็นขั้วเช่นเดียวกัน คาดว่าหมู่ฟังก์ชันทั้งสองสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกัน ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารตัวเติมเคลย์มีสมบัติที่ดีขึ้น

จากการวิจัย พบว่า การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากน้ำยางข้นโดยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น การเตรียมดิสเพอร์ชันของเคลย์เตรียมโดยการกวนให้กระจายตัวในน้ำ พบว่า การกวนเป็นเวลานานขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคลดลง โดยการกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.4 ไมครอน ความหนืดมูนี ความเค้นเฉือน และความหนืดเฉือนของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติ การผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในสถานะน้ำยางเปรียบเทียบกับผสมในสถานะแห้งบนลูกกลิ้ง พบว่า ความหนืดมูนี ความเค้นเฉือน และความหนืดเฉือน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ และปริมาณสารตัวเติมเคลย์ โดยที่การผสมในสถานะน้ำยางให้สมบัติดังกล่าวข้างต้นสูงกว่าการผสมในสถานะแห้งบนลูกกลิ้งเล็กน้อย เมื่อนำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทั้งที่ผสมในสถานะน้ำยางและสถานะแห้งบนลูกกลิ้งมาผสมกับสารวัลคาไนซ์ ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังนี้คือ เวลาสกอซมีค่าลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์และปริมาณเคลย์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด และเวลาวัลคาไนซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์และปริมาณสารตัวเติมเคลย์ ส่วนอัตราการวัลคาไนซ์ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์อยู่ระหว่าง 0 ถึง 20 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์สูงขึ้น ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ลดลง ส่วนการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเคลย์ ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ลดลง การผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเคลย์โดยวิธีการทั้งสองข้างต้น ให้ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อนำยางผสมสารเคมีจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมเคลย์ทั้งสองวิธีการข้างต้นไปทดสอบสมบัติ

ทางกายภาพ พบว่า ค่าความเค้นที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซนต์ และความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู้อีพอกไซด์และสารตัวเติมเคลย์ โดยที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู้อีพอกไซด์ 40 โมล เปอร์เซนต์ และใช้สารตัวเติมเคลย์ 25 phr ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด สมบัติด้านระยะยืดสูงสุด พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณหมู้อีพอกไซด์และสารตัวเติมเคลย์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติด้านความต้านทานต่อการฉีกขาด พบว่า กรณีที่ไม่มีสารตัวเติมเคลย์ เมื่อปริมาณหมู้อีพอกไซด์อยู่ระหว่าง 0 ถึง 20 เปอร์เซนต์โมล ทำให้สมบัติดังกล่าวลดลง แต่การเพิ่มปริมาณหมู้อีพอกไซด์มากกว่านี้ จะทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณเคลย์ในยางธรรมชาติทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง ส่วนในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เคลย์ปริมาณระหว่าง 0 ถึง 50 phr เมื่อใช้เคลย์มากกว่านั้นจะทำให้สมบัติดังกล่าวลดลง สมบัติด้านความแข็งแรงพบว่า ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู้อีพอกไซด์และสารตัวเติมเคลย์ ส่วนสมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่ง พบว่า หลังการบ่มเร่ง ทำให้ค่าความเค้นที่ระยะยืด 100, 300, 500 เปอร์เซนต์ และความต้านทานต่อการฉีกขาด มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดสูงสุดมีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่า เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่ง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู้อีพอกไซด์และเคลย์ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเคลย์ทั้งสองวิธีการผสม พบว่า สารตัวเติมเคลย์เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมกับเคลย์ทั้งสองวิธีการ พบว่า การผสมในสถานะน้ำยางได้สมบัติดีกว่าเล็กน้อย

จากผลการวิจัย สามารถเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารตัวเติมเคลย์ในสถานะน้ำยาง โดยให้สมบัติด้านต่างๆ คือ ความหนืดมูนี ความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน ลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพ ที่ใกล้เคียงกับการผสมในสถานะแห้งบนลูกกลิ้ง โดยที่การใช้สารตัวเติมเคลย์ทำให้เกิดแรงกระทำทางเคมีกับหมู้อีพอกไซด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ การใช้ปริมาณหมู้อีพอกไซด์หรือปริมาณเคลย์ที่เหมาะสมทำให้ได้สมบัติต่างๆที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ลดเวลาในการผสมยางกับสารตัวเติมเคลย์ในกระบวนการแปรรูปยาง

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์จากน้ำยางธรรมชาติขั้น

การเตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์ใช้สารเคมีดังตารางที่ 1 มีขั้นตอนการผสมดังนี้คือ นำน้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA) (ผลิตโดยบริษัท ยะลาตาเท็กซ์ จำกัด มีปริมาณ เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 60 %) มาเจือจางให้มีเนื้อยางแห้งเท่ากับ 20 % เติม Teric N-30 (เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิด Non-ionic surfactant ผลิตโดย บริษัท Huntsman Co., Ltd.) โดยทำหน้าที่เป็น Surfactant เพื่อให้อนุภาคยางเสถียร กวนให้เข้ากันประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นเติมกรดเปอร์ฟอร์มิก (มีความเข้มข้น 94 % ผลิตโดยบริษัท Ried-de Haen Co., Ltd.) อย่างช้าๆ ใช้เวลาประมาณ 90 นาที แล้วเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มีความเข้มข้น 50 % โดยน้ำหนัก ผลิตโดย บริษัท Ried-de Haen Co., Ltd) อย่างช้าๆ เช่นเดียวกัน ใช้เวลาประมาณ 60 นาที ปลอ่ยให้เกิดปฏิกิริยาที่ 50°C เมื่อหยุดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หมดแล้ว เก็บตัวอย่างน้ำยางที่ เวลาการเกิดปฏิกิริยา 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ นำน้ำยางพอกไซค์ที่เตรียมได้มาจับตัวด้วยเมทานอล แล้วนำไปรีดเป็นแผ่นบางๆ ด้วยเครื่องบีบยาง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อชะล้างเอาสารเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกไป ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C จนแห้ง เก็บยางที่เตรียมได้ในถุงพลาสติกที่ป้องกันการสัมผัสกับอากาศ แล้วนำยางธรรมชาติพอกไซค์ที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง FT-IR ตามหัวข้อที่ 3.7.1

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติพอกไซค์

สารเคมี	ปริมาณตามสูตร	ปริมาณที่ใช้(กรัม)
60% Latex dry weigh (mole/l)	1.7	115.6
50% Hydrogen peroxide (mole/l)	2.6	88.4
94% Formic acid (mole/l)	0.9	41.4
10% Teric N-30 (g/l)	13	13

2.2 การเตรียมดินพอร์ซันเคลย์ (Clay dispersion)

เตรียมสารตัวเติมเคลย์ให้กระจายตัวในน้ำ ให้มีความเข้มข้น 40 % w/w โดยน้ำหนัก กวนด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค (Coulter Particle Size Analyzer) รุ่น Coulter ls 230



รูปที่ 2.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค (Coulter Particle Size Analyzer) รุ่น Coulter ls 230

2.3 การผสมน้ำยางกับดิสเพอร์ชันเคลย์

นำน้ำยางธรรมชาติมาเจือจางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC) เท่ากับ 20% โดยน้ำหนัก และนำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่อพอกไซค์ต่างๆ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.1 กวนผสมกับ 40 % w/w dispersion ของสารตัวเติมเคลย์ ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.2 โดยใส่ดิสเพอร์ชันของเคลย์ลงไปในน้ำยาง แล้วกวนด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจับตัวด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก (ในกรณีน้ำยางธรรมชาติ) หรือเมทานอล (กรณีน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์) โดยแปรปริมาณสารตัวเติมเคลย์ดังนี้คือ 0, 25, 50, 100, 150 และ 200 phr ดังตารางที่ 2 หลังจากนั้นนำยางที่จับตัวได้ไปรีดแผ่นด้วยเครื่องบีบยางสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C จนแห้ง แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่มีการผ่านก๊าซไนโตรเจน นำยางที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติการไหลคือ การทดสอบความหนืดมูนนี่ และการทดสอบความต้านทานต่อการไหลแบบเนียนด้วยเครื่องโรซานคาร์ปิลลารีรีโอมิเตอร์ ตามหัวข้อ 2.7.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซค์ และเคลย์ที่ใช้

สารเคมี	สูตร, phr					
	1	2	3	4	5	6
NR or ENR latex, phr	100	100	100	100	100	100
Clay dispersion, phr	0	25	50	100	150	200

2.4 การผสมยางกับสารตัวเติมเคลย์ในสถานะแห้ง

นำยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่จับตัวด้วยกรดฟอร์มิกหรือเมทานอล และทำเป็นแผ่นแห้งมาผสมกับสารตัวเติมเคลย์บนเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 70°C ตามสูตรดังตารางที่ 2.3

นำยางที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติการไหลคือ การทดสอบความหนืดมูนนี่ และการทดสอบความต้านทานต่อการไหลแบบเฉือนด้วยเครื่องโรซานคาร์ปิลาร์รีโอมิเตอร์ ตามหัวข้อ 2.7.2 แล้วเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวของยางผสมสารตัวเติมเคลย์ที่ได้กับการผสมในสถานะน้ำยาง

ตารางที่ 2.3 ปริมาณยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และเคลย์ที่ใช้

สารเคมี	ปริมาณ, phr					
	1	2	3	4	5	6
NR or ENR, phr	100	100	100	100	100	100
Clay, phr	0	25	50	100	150	200
เวลาผสม, นาที	0	16	24	28	31	34

2.5 สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสมสารตัวเติมเคลย์

ในการวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ (1) ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสมเคลย์ในสถานะน้ำยาง เมื่อได้ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสมสารตัวเติมเคลย์แล้ว นำยางที่เตรียมได้ไปผสมกับสารเคมีอื่นๆ ดังตารางที่ 4 และขั้นตอนการผสมตามตารางที่ 5 ส่วนที่ (2) การผสมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในสถานะแห้งบนลูกกลิ้ง โดยนำยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่อบแห้งแล้วผสมกับสารเคมีอื่นๆ ดังตารางที่ 6 และขั้นตอนการผสมตามตารางที่ 7 เก็บยางคอมเพาด์ที่เตรียมได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์และเตรียมเป็นชิ้นตัวอย่างทดสอบตามหัวข้อ 3.6

ตารางที่ 2.4 สูตรยางที่ใช้ในการผสมตามมาตรฐาน ASTM D3184-89

สารเคมี	ปริมาณ, phr
Filled NR* or ENR*	100, 125, 150, 200, 250, 300
ZnO	5
Stearic acid	2
TBBS	0.7
Sulphur	2.25

* ยาง NR หรือ ENR ที่ผสมดิสเพอร์ชันของเคลย์ในสถานะน้ำยาง

ตารางที่ 2.5 ขั้นตอนการผสมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับสารเคมีอื่นๆ

สารเคมี	เวลา, นาที
Filled NR or ENR	3
ZnO	3
Stearic acid	2
TBBS	2
Sulphur	2
ม้วนยางผ่านลูกกลิ้ง	6 ครั้ง

ตารางที่ 2.6 สารเคมีที่ใช้ในการผสมตามมาตรฐาน ASTM D3184-89

สารเคมี	ปริมาณ, phr
NR or ENR	100
Clay	แปรปริมาณ
ZnO	5
Stearic acid	2
TBBS	0.7
Sulphur	2.25

*แปรปริมาณสารตัวเติมเคลย์ 0, 25, 50, 100, 150 และ 200 phr

ตารางที่ 2.7 ขั้นตอนในการผสมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับสารเคมีอื่นๆ

ขั้นตอนการผสม	เวลา, นาที
NR or ENR	3
Clay	0, 16, 24, 28, 31, 34 *
ZnO	3
Stearic acid	2
TBBS	2
Sulphur	2
ม้วนยางผ่านลูกกลิ้ง	6 ครั้ง

* เวลาที่ใช้ในการผสมสารตัวเติมเคลย์ 0, 25, 50, 100, 150, และ 200 phr ตามลำดับ

2.6 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.5 ไปทดสอบความหนืดมูนนี้ด้วยเครื่องมูนนีวิสโคมิเตอร์ ตามหัวข้อ 2.7.1 ลักษณะการวัดคาไซน์ด้วยเครื่อง ODR 2000 ตามหัวข้อ 3.7.2 จากนั้นนำยางคอมปาวด์ไปอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดเบ้าไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160°C ตามเวลาการวัดคาไซน์ที่ทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 โดยใช้

ความดัน 500 psi เก็บยางวัลคาไนซ์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปตัดชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพตามหัวข้อที่ 3.7.3 ความทนทานต่อการบวมพองตามหัวข้อที่ 3.7.4 และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ตามหัวข้อที่ 3.7.5

2.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

2.7.1 วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

นำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมได้ประมาณ 1 กรัม มาละลายในคลอโรฟอร์ม นำสารละลายที่ได้ไปหยดบนผลึกโซเดียมคลอไรด์นำไปอบที่ 50°C จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR รุ่น 1600 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer Co., Ltd.)

2.7.2 การทดสอบสมบัติการไหล

2.7.2.1 การทดสอบความหนืดมูนนี่

นำยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทั้งที่ผสมและไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ตามหัวข้อ 2.3-2.4 รวมทั้งที่ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารวัลคาไนซ์ตามหัวข้อ 2.5 มาทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer รุ่น Shell Tellus 27 ผลิตโดยบริษัท SPRI Co., Ltd.) ที่อุณหภูมิ 125°C ด้วยใช้โรเตอร์ใหญ่ อุณหภูมิขึ้นตัวอย่าง 1 นาที เติมน้ำทดสอบและอ่านค่าความหนืดที่เวลา 4 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1646-89 รายงานผลในรูปแบบของ ML (1+4), 125°C

2.7.2.2 การทดสอบการไหลแบบเฉือน (Shear Properties)

นำยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทั้งที่ผสมและไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ตามหัวข้อ 2.3-2.4 รวมทั้งที่ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารวัลคาไนซ์ตามหัวข้อ 2.5 มาทดสอบการไหลแบบเฉือนด้วยเครื่องโรซานคาปิลลารีรีโอมิเตอร์ (Rosand Capillary Rheometer ผลิตโดยบริษัท Rosand Precision Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ) ดังรูปที่ 2 รายงานผลการทดสอบในรูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน (Shear stress, Pa) และความหนืดเฉือน (Shear viscosity, Pa.s) กับอัตราเฉือน (Shear rate, s^{-1}) ที่อุณหภูมิ 125°C ในช่วงอัตราเฉือน $4\text{-}1600\text{ s}^{-1}$ ใช้หัวคายคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และยาว 32 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ยี่ห้อโรซาน (Rosand Capillary Rheometer)

2.7.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมจากหัวข้อ 2.5 มาทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 (ผลิตโดยบริษัท Monsanto Co., Ltd.) ดังรูปที่ 3 ตามมาตรฐาน ASTM D2084-95 ที่อุณหภูมิ 160°C งานโลหะบิดไป-มาเป็นมุม 1 องศา แล้วหาค่าต่างๆ ดังนี้คือ แรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) เวลาสกอช (Scorch time) เวลาสุก (Cure time) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque) และอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index)



รูปที่ 2.3 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบหมุน (Oscillating Disk Rheometer) รุ่น ODR 2000

2.7.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

นำยางวัลคาไนซ์ไปตัดเป็นชิ้นทดสอบความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาด หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างดังนี้

2.7.4.1 การทดสอบสมบัติด้านการดึง (Tensile properties)

ทดสอบความทนทานต่อการดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 (2000) โดยใช้เครื่อง Tensometer (รุ่น H 10KS ยี่ห้อ Hounsfield ผลิตโดยบริษัท Hounsfield test equipment ประเทศอังกฤษ) ดังรูปที่ 4 ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell แบบ die C) ใช้อัตราเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที วัดแรงดึงและระยะยืด แล้วนำไปคำนวณสมบัติต่างๆดังนี้คือ โมดูลัสที่ระยะยืด 100, 300, 500 เปอร์เซ็นต์ (100, 300, 500% Modulus) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ระยะยืดสูงสุด (% Elongation at break)



รูปที่ 2.4 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensometer)

2.7.4.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 (2000) โดยโดยใช้เครื่อง Tensometer ขึ้นทดสอบแบบมุม (die B) ใช้อัตราเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที วัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ขึ้นทดสอบขาดออกจากกัน รายงานในหน่วย N/mm

2.7.4.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทดสอบความแข็งของยางตามมาตรฐาน ASTM D2240-97 (2000) โดยนำชิ้นทดสอบที่ได้จากการอัดเข้ามีความหนาประมาณ 8-10 มิลลิเมตร มาทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่อง IRHD (ผลิตโดยบริษัท H.W. Wallace & Croydon Company Limited) โดยใช้หัวเข็มกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 มิลลิเมตร ซึ่งใช้สำหรับยางที่มีความแข็งช่วง 30-85 IRHD รายงานค่าความแข็งของยางในหน่วย IRHD

2.7.4.4 การทดสอบความทนทานต่อการบ่มเร่ง (Ageing resistance)

ทดสอบสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนตามมาตรฐาน ASTM D454 (2000) โดยนำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) และชิ้นทดสอบแบบมุม (Die B) มาบ่มเร่งด้วยความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาแล้ว ให้ตั้งชิ้นทดสอบยางไว้อย่างน้อย 16 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทดสอบสมบัติด้านการดึงด้วยเครื่อง Tensometer ตามหัวข้อ 3.7.4.1 แล้วคำนวณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้สูตรคำนวณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$\text{Change in property, \%} = 100 \times \left[\frac{A-O}{O} \right]$$

โดยที่ A คือ สมบัติหลังการบ่มเร่ง

O คือ สมบัติก่อนการบ่มเร่ง

2.7.5 การทดสอบการบวมพอง (Swelling resistance)

ทดสอบการบวมพองในตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM D471 โดยนำแผ่นยางที่ได้จากการอัดเบ้ามาตัดเป็นชิ้นทดสอบกว้าง×ยาว 1 เซนติเมตร หนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักก่อนแช่ จากนั้นนำตัวอย่างยางแช่ในตัวทำละลายโทลูอีนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในภาชนะที่ปิดมิดชิด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังแช่ คำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมพองตามสูตรดังนี้

$$\text{Swelling, \%} = 100 \times \left[\frac{W_s - W_o}{W_o} \right]$$

โดยที่ W_s คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังการแช่ในโทลูอีน (กรัม)

W_o คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในโทลูอีน (กรัม)

2.7.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphological properties)

ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ Leo รุ่น 145 VP ผลิตโดยบริษัท Leo ประเทศอังกฤษ) ดังรูปที่ 5 โดยการนำชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์มาแช่ในไนโตรเจนเหลว หักชิ้นตัวอย่างเพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ หลังจากนั้นนำยางไปอบไล่ความชื้น นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทำการเคลือบด้วยทองคำ โดยวางตัวอย่างในเครื่องสำหรับเคลือบทองด้วยสุญญากาศ ปลอยก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้ามาและปรับกระแสไฟฟ้า ก๊าซอาร์กอนจะเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนวิ่งไปชนแผ่นทองและลงมาเคลือบที่ชิ้นตัวอย่าง นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบทองแล้วมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอไซค์ที่ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

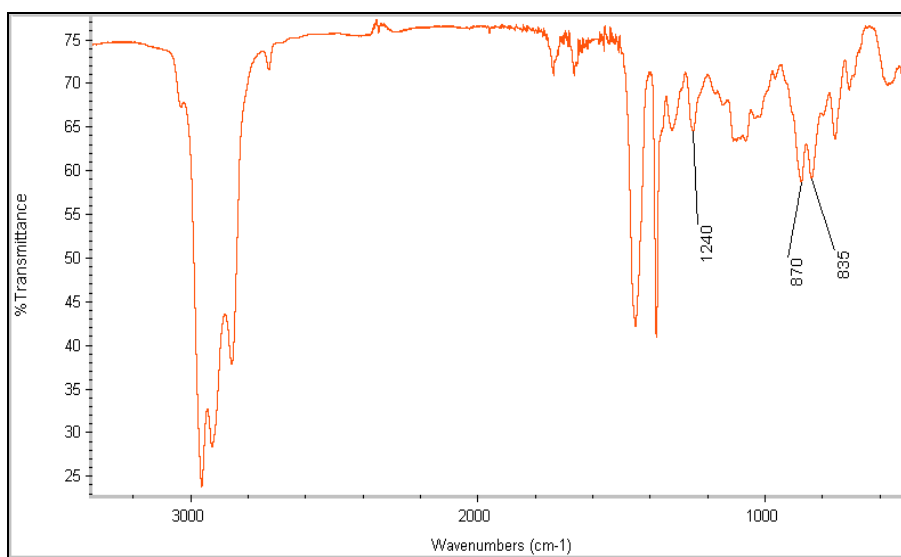
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การเตรียมยางธรรมชาติอ็อกไซค์จากน้ำยางข้น

จากการเตรียมยางธรรมชาติอ็อกไซค์แล้วจับตัวน้ำยางอ็อกไซค์ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ แล้วนำยางที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อ็อกไซค์ที่มีในโครงสร้างยางธรรมชาติตามวิธีการในหัวข้อ 2.7.1 โดยใช้เครื่องอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) ได้สเปกตรัมของยางธรรมชาติอ็อกไซค์ ดังรูปที่ 3.1 จะพบพีกการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่อ็อกไซค์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} รวมทั้งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญดังตารางที่ 3.1 วิเคราะห์หาปริมาณหมู่อ็อกไซค์โดยการวัด Absorbance ratio (Ar) ของพีกที่เลขคลื่น 870 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่อ็อกไซค์ และเลขคลื่น 835 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกิด out-of-plane bending ของพันธะ C-H ที่เกาะกับ C=C ของ cis-1,4-polyisoprene แล้วคำนวณหาโมลเปอร์เซ็นต์อ็อกไซค์จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.1

$$Ar = \frac{a_{870}}{[a_{870} + a_{835}]} \quad (3.1)$$

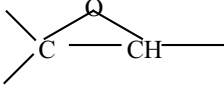
โดยที่ a_{870} และ a_{835} คือ ความสูงของพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาปริมาณอ็อกไซค์โดยใช้กราฟมาตรฐานดังรูปที่ 3.2 (Davey and Loadman, 1984) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำปฏิกิริยากับปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์อ็อกไซค์ดังรูปที่ 3.3

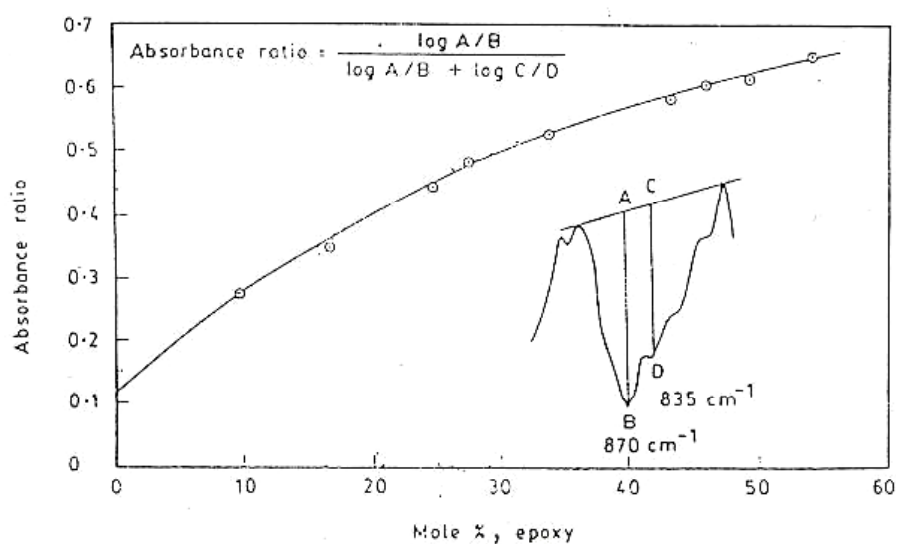


รูปที่ 3.1 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอ็อกไซค์

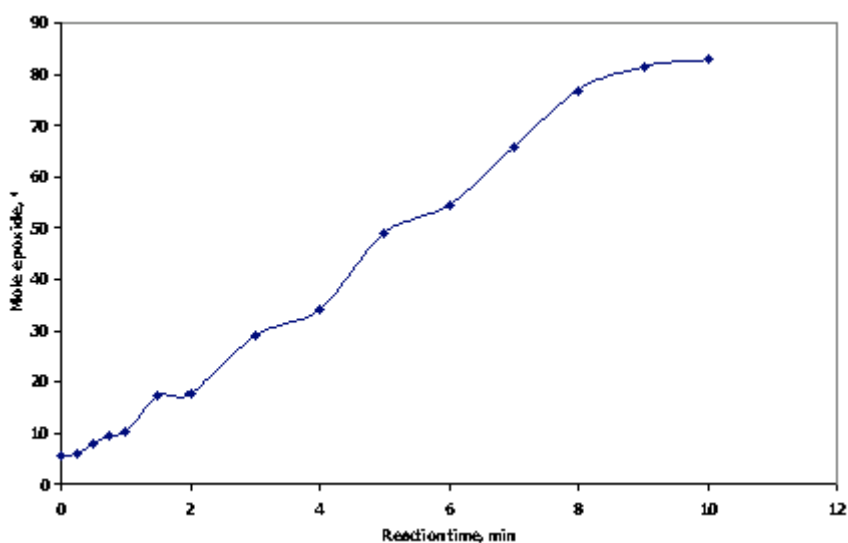
ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันจากสเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

(Davey and Loadman, 1984)

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น, cm^{-1}
—CH_3	2956, 1377
$\text{—CH}_2\text{—}$	2925, 1446
$\text{C}=\text{C}$	1657
$\text{—C}=\text{CH—}$ (cis-1,4)	835
	870, 1240

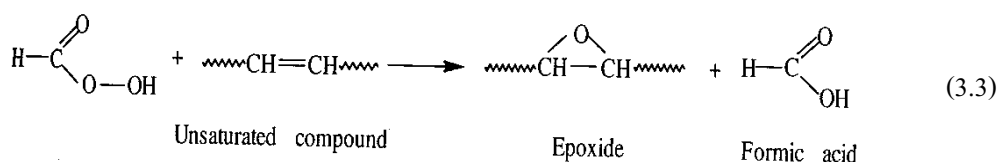
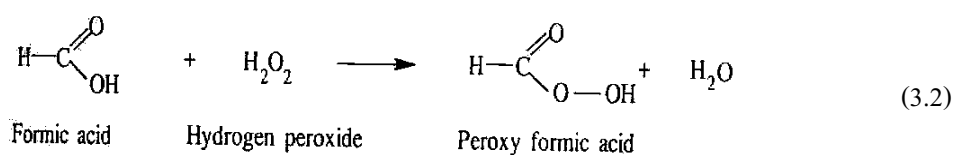


รูปที่ 3.2 ตำแหน่งพีคอินฟราเรดและกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Davey and Loadman, 1984)



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันกับปริมาณอีพอกไซด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 3.3 พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันนานขึ้นจะปรากฏหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลของยางธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากกรดเปอร์ฟอร์มิกที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 3.2 (ในรูปที่ 3.4) จะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวของยางธรรมชาติดังสมการที่ 3.3 (ในรูปที่ 3.4) ได้ผลิตภัณฑ์คือโมเลกุลยางธรรมชาติที่มีวงแหวนอีพอกไซด์ในโครงสร้าง โดยกรดฟอร์มิกที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นกรดเปอร์ฟอร์มิกได้อีก ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยาหมด ดังนั้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นปริมาณหมู่อีพอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลยางธรรมชาติมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิกแล้วกลายเป็นโมเลกุลยางที่มีหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาอีพอกไซด์เดชันโดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Baker and Gelling, 1987)

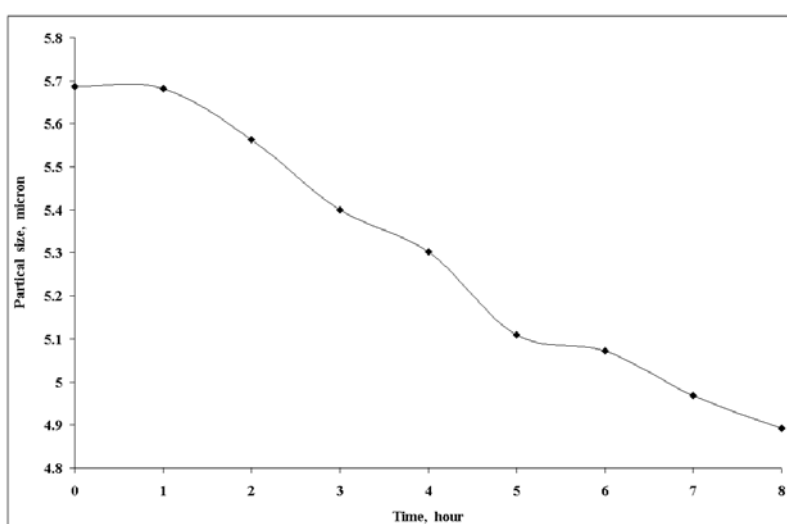
จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.3 สามารถกำหนดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพื่อเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ให้ได้ระดับโมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ที่ต้องการคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่ต้องการ

โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ที่ ต้องการ	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง : นาที)
10	0 : 50
20	2 : 16
30	3 : 26
40	4 : 25
50	5 : 23

3.2 การเตรียม ดิสเพอร์ชันเคลย์

เตรียมสารตัวเติมเคลย์ให้มีความเข้มข้น 40% w/w dispersion โดยกวนที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที นำไปวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคตามวิธีการในหัวข้อ 2.2 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกวน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเติมเคลย์ในดิสเพอร์ชันที่ระยะเวลาการกวนต่างๆ

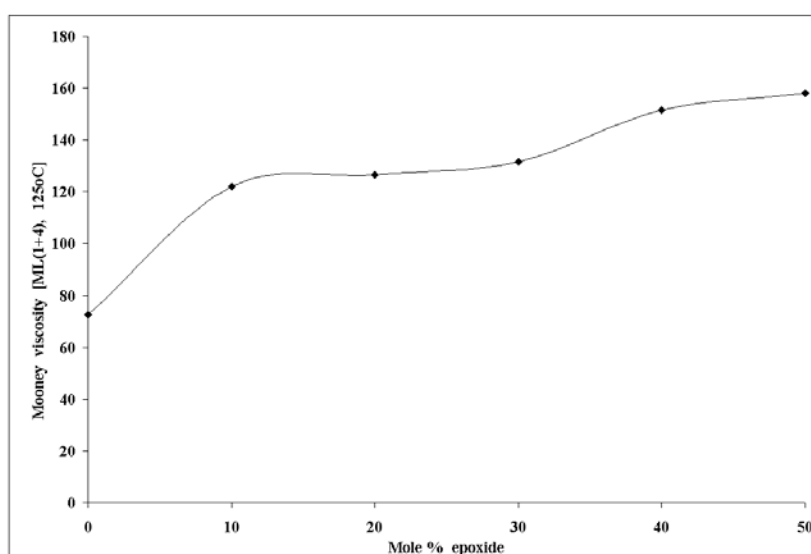
จากรูปที่ 3.5 จะได้ว่าขนาดอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์จะลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการกวน เนื่องจากการกวนทำให้ขนาดอนุภาคของเคลย์ที่รวมตัวกัน (agglomeration) เกิดการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ในการทดลองขั้นตอนต่อไปใช้เวลาในการเตรียมคิสเปอร์ชันเคลย์ 3 ชั่วโมง ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 5.4 ไมครอน แล้วนำคิสเปอร์ชันเคลย์ที่ได้ไปผสมกับน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เพื่อเตรียมเป็นมาสเตอร์แบท (Masterbatch) ต่อไป

3.3 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

น้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ที่เตรียมได้จากตารางที่ 2.1 มาทดสอบความหนืดมูนนี้ด้วยเครื่องมือวัดวิสโคมิเตอร์ ตามหัวข้อ 2.7.2.1 และสมบัติการไหลแบบเนียนด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ตามหัวข้อ 2.7.2.2 ได้ผลการทดสอบดังนี้

3.3.1 ความหนืดมูนนี้

น้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ มาทดสอบความหนืดมูนนี้ ที่อุณหภูมิ 125 °C โดยใช้โรเตอร์ใหญ่ แล้วรายงานผลในรูปของ [ML (1+4), 125°C] ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.6

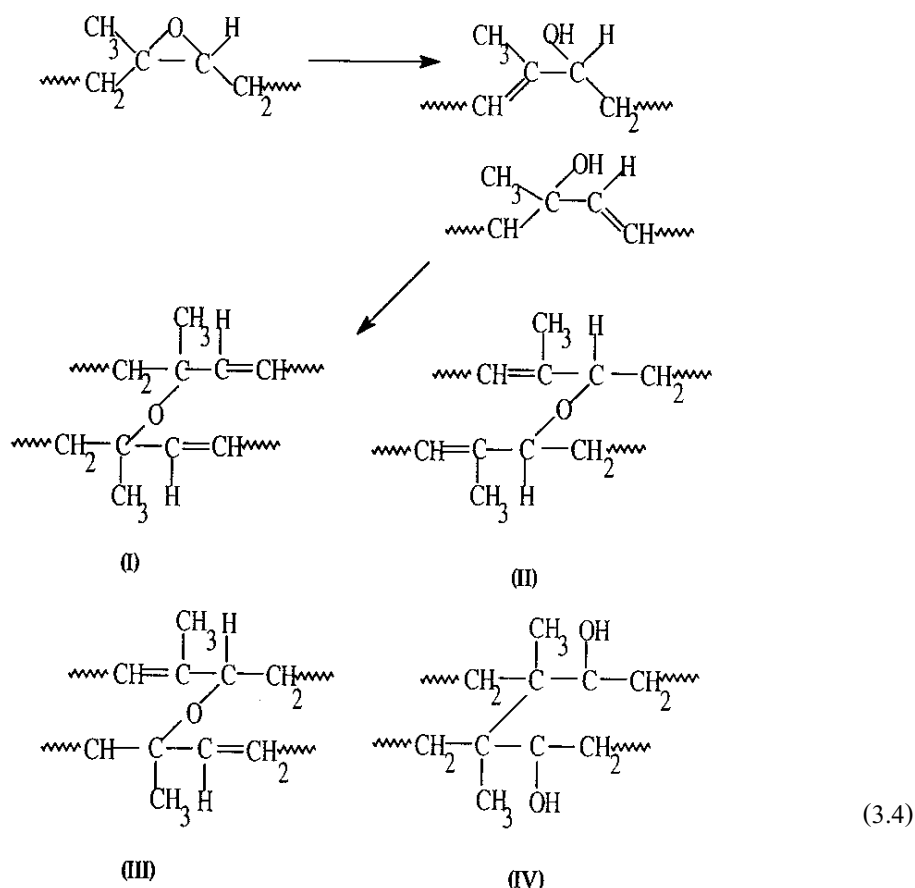


รูปที่ 3.6 ความหนืดมูนนี้ [ML (1+4), 125°C] ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนนี้ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีความหนืดมูนนี้ต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นยางที่มีขี้ โดยมีหมู่อีพอกไซด์เป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างหมู่อีพอกไซด์ด้วยกันเองได้ ทำให้ง่ายธรรมชาติอีพอกไซด์ต้านทานต่อแรงเฉือนในขณะที่เกิดการหมุนของโรเตอร์สูงกว่ายางธรรมชาติ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างกัน พบว่า ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์มากกว่า มีความหนืดมูนนี้สูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณของหมู่

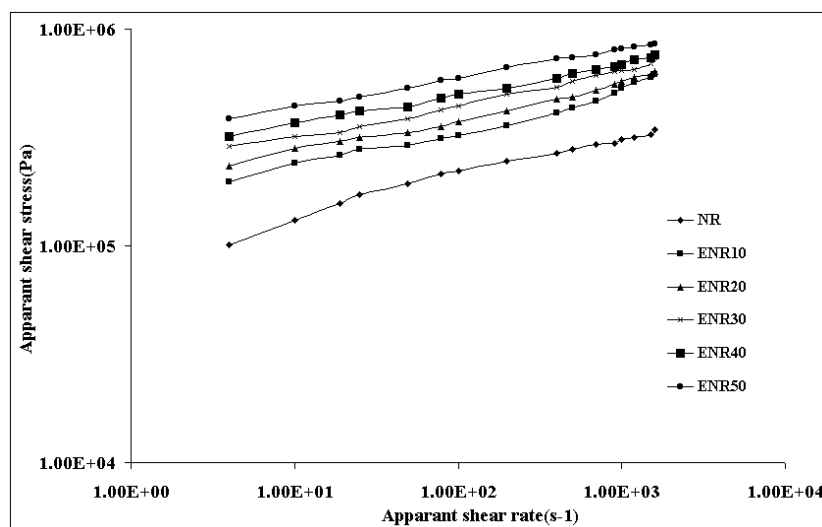
พอกไซด์น้อยกว่า เนื่องจากหมู่พอกไซด์สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกันมากกว่านั่นเอง โดยโมเลกุลของยางธรรมชาติพอกไซด์สามารถเกิดการเชื่อมโยงกันเองได้จากปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนพอกไซด์เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ในขณะหลอม ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเป็น ether linkage (I-III) และ C-C linkage (IV) ดังรูปที่ 3.7 ดังนั้นยางธรรมชาติพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่พอกไซด์มากกว่าจะต้านทานต่อแรงเฉือนมากกว่ายางธรรมชาติพอกไซด์ที่มีปริมาณพอกไซด์น้อยกว่า



รูปที่ 3.7 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกันเองเนื่องจากการเปิดของวงแหวนพอกไซด์ (Mohanty and Nando, 1997)

3.3.2 ความต้านทานการไหลแบบเฉือนในเครื่องโรชันคาร์ปิลลารี

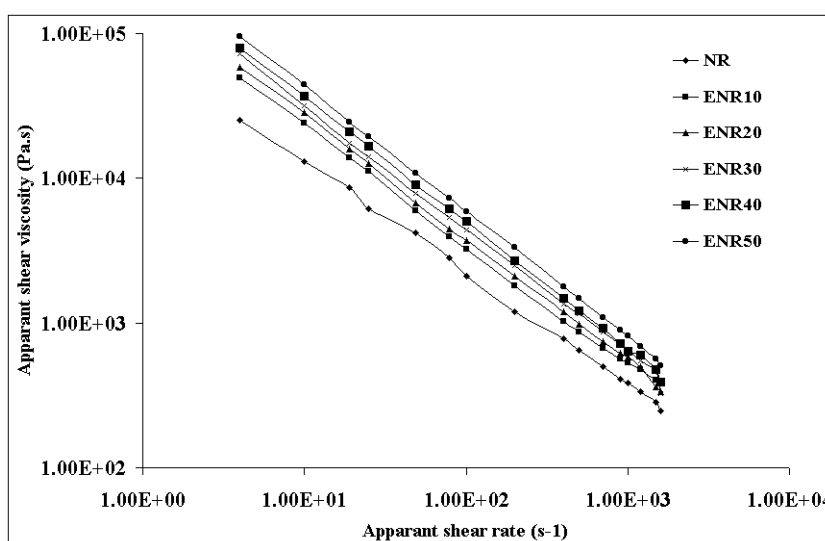
ทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่มีอัตราเฉือน (shear rate, s^{-1}) ต่างกันมากกระทำ จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่พอกไซด์ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (shear rate, s^{-1}) กับความเค้นเฉือน (shear stress, Pa) ดังรูปที่ 3.8 และอัตราเฉือนกับความหนืดเฉือน (shear viscosity, Pa.s) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือน ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.8 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์พบว่า ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีความเค้นเฉือนสูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีหมู่อิพอกไซด์ในโครงสร้างทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างหมู่อิพอกไซด์ด้วยกันเอง ทำให้ต้องใช้ความเค้นเฉือนเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการไหลสูงกว่ายางธรรมชาติซึ่งมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี้ ดังรูปที่ 3.6

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ความเค้นเฉือนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เพราะหมู่อิพอกไซด์สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกันได้สูงขึ้นดังรูปที่ 3.7 ทำให้ความเค้นเฉือนของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์มากกว่ามีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ต่ำกว่า



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือน ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่างๆ

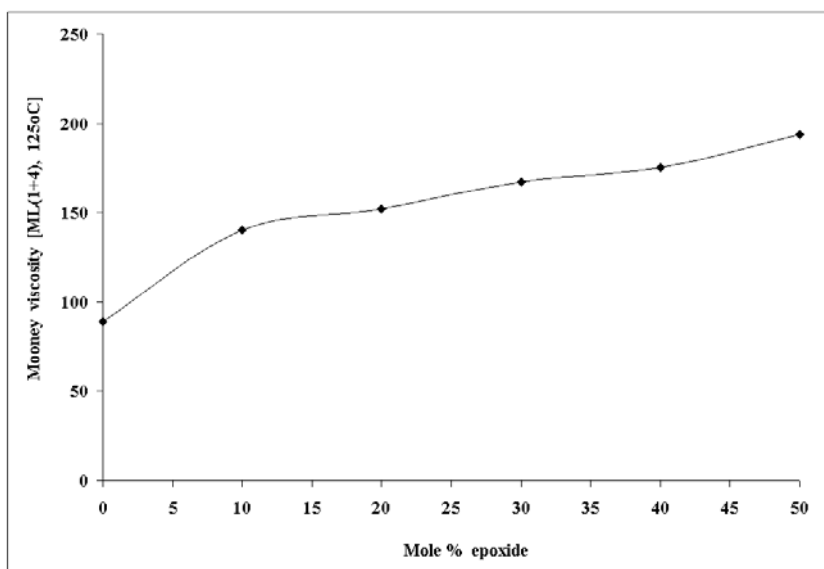
จากรูปที่ 3.9 พบว่า ยางธรรมชาติพอกไซค์มีความหนืดเฉือนสูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากการที่ยางธรรมชาติพอกไซค์มีหม้อพอกไซค์ซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างหม้อพอกไซค์ด้วยกันเองได้ทำให้ยางธรรมชาติพอกไซค์มีความหนืดเฉือนสูงกว่ายางธรรมชาติที่เกิดแรงกระทำระหว่างกันต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี้ดังรูปที่ 3.6

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณหม้อพอกไซค์เพิ่มขึ้นสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างหม้อพอกไซค์ด้วยกันเองสูงขึ้น ดังที่กล่าวข้างต้น ความหนืดเฉือนของยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์มากกว่ามีค่าสูงกว่า

3.4 สมบัติของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารตัวเติมเคลย์

3.4.1 อิทธิพลของปริมาณหม้อพอกไซค์

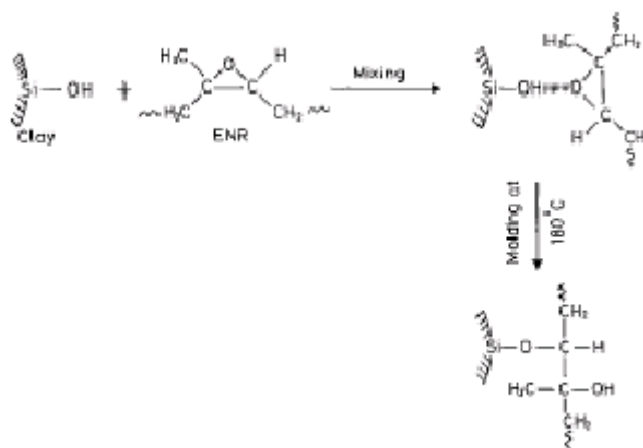
นำยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่างๆคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมกับ 40% w/w ดิสเพอร์ชันเคลย์ปริมาณ 50 phr ตามตารางที่ 2.2 มาจับตัวด้วยกรดฟอร์มิกหรือเมทานอล แล้วนำยางที่ได้ไปอบแห้งที่ 40°C ทดสอบความหนืดมูนนี้ด้วยเครื่องมูนนี้วิสโคมิเตอร์ ตามหัวข้อ 2.7.2.1 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.10 และสมบัติการไหลแบบเฉือนด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ตามหัวข้อ 2.7.2.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (shear rate, s^{-1}) กับความเค้นเฉือน (shear stress, Pa) ดังรูปที่ 3.12 และอัตราเฉือนกับความหนืดเฉือน (shear viscosity, Pa.s) ดังรูปที่ 3.13



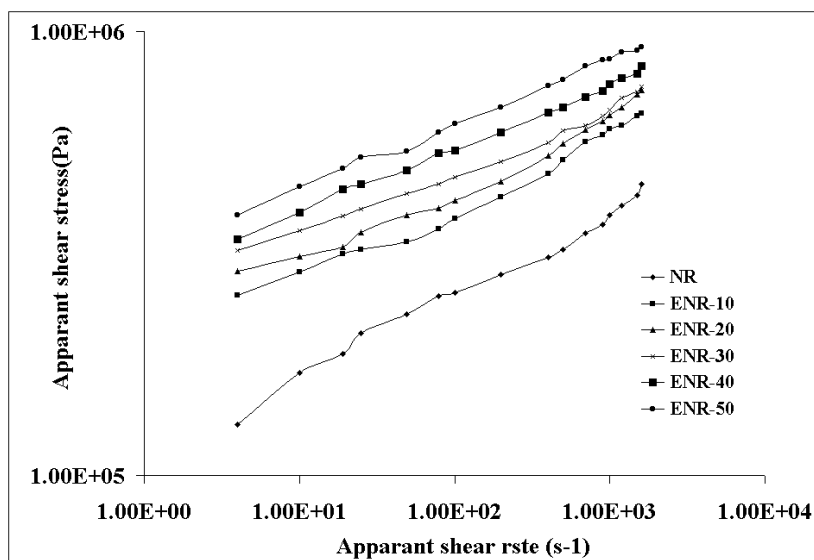
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่ [ML (1+4), 125°C] ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ต่างๆผสมกับ 40% w/w ดิสเพอร์ชันเคลย์ ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.10 พบว่า เมื่อปริมาณของหมู่อีพอกไซด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดมูนนี่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นยางที่มีขี้ สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลยาง ดังรูปที่ 3.7 รวมทั้งหมู่อีพอกไซด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups) ที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ซึ่งมีขี้เหมือนกัน ได้ดีกว่ายางธรรมชาติ (Manna, *et al.*, 1999) ทำให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความหนืดมูนนี่สูงกว่ายางธรรมชาติ

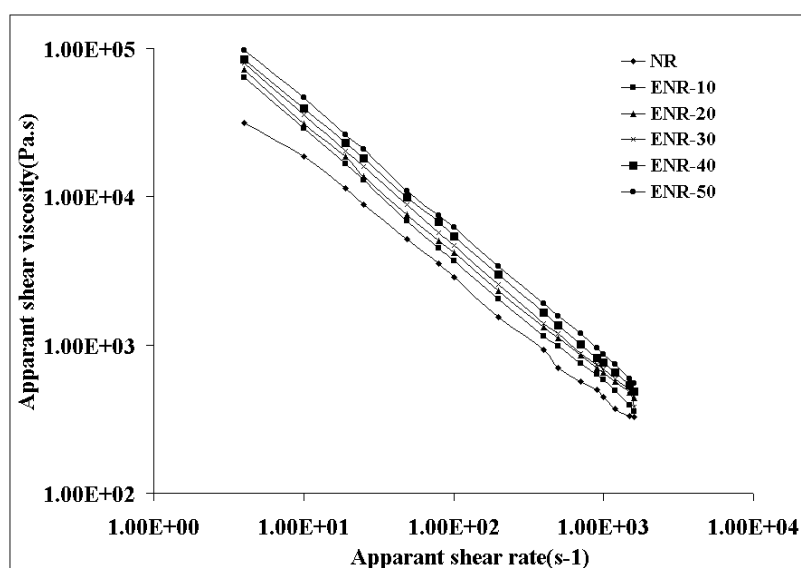
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณหมู่อีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ใช้ปริมาณเคลย์เท่ากัน พบว่า ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากกว่าจะมีความหนืดมูนนี่สูงกว่า เนื่องจากมีหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างทำให้เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้ความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์สูงกว่ายางธรรมชาติ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ไอพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติไอพอกไซด์ กับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ (Manna, *et al.*, 1999)



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือน ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติไอพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ต่างๆ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

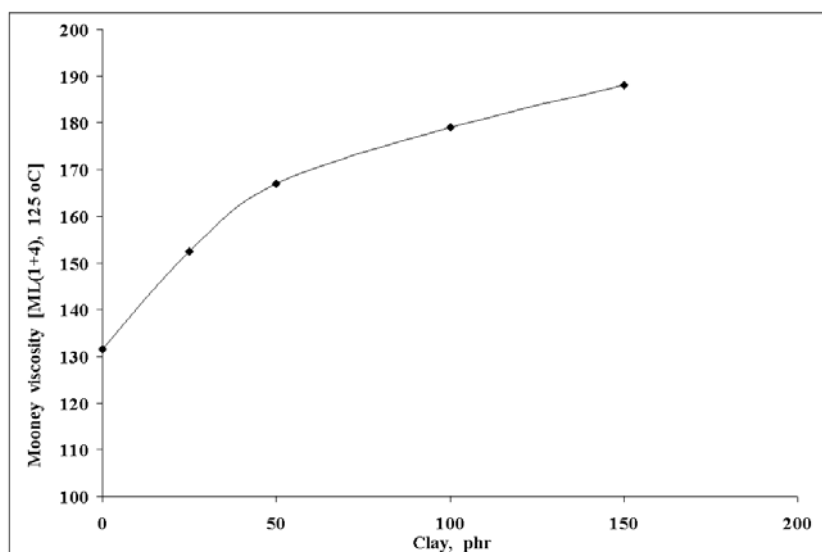


รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือน ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมใช้สารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.12-3.13 พบว่า เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณหม้อพอกไซค์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมเคลย์เท่ากัน พบว่า ยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ในโครงสร้างสูงกว่า จะมีความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนสูงกว่ายางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์น้อยกว่า เนื่องจากการที่หม้อพอกไซค์สามารถเกิดอันตรกิริยาได้ 2 ลักษณะคือ (1) เกิดระหว่างหม้อพอกไซค์ด้วยกันเอง และ (2) เกิดระหว่างหม้อพอกไซค์กับหมู่ไฮดรอกซิลของสารตัวเติมเคลย์ ทั้งพันธะไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์ เมื่อถูกกระทำแบบเฉือนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะต้านการเฉือนที่เกิดจากการไหล ทำให้ยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์มากกว่ามีความทนทานต่อการผิดรูปแบบเฉือนสูงกว่ายางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่ำกว่า

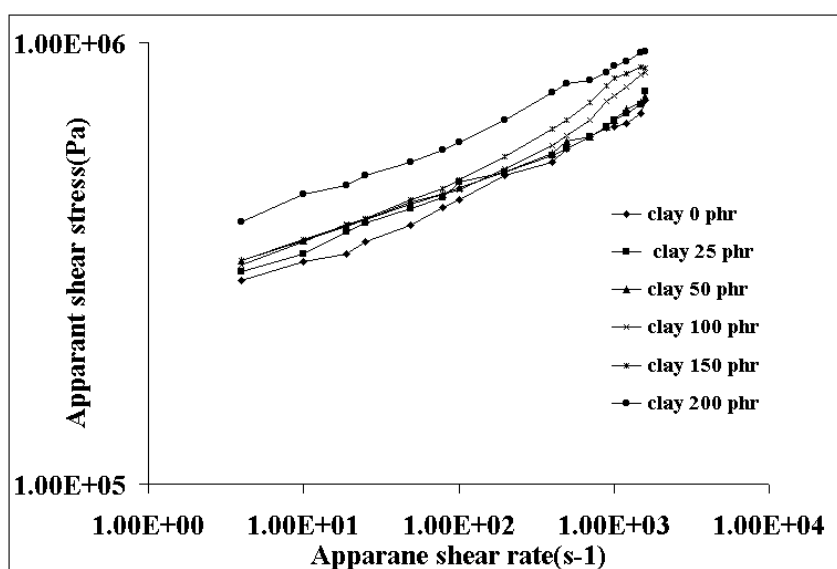
3.4.2 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมเคลย์

นำน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ มาผสมกับสารตัวเติมเคลย์ความเข้มข้น 40% w/w โดยแปรปริมาณเคลย์ต่างๆคือ 0, 25, 50, 100, 150 และ 200 phr ตามตารางที่ 2.2 มาจับตัวด้วยกรดฟอร์มิกหรือเมทานอล แล้วนำยางที่ได้ไปอบแห้งที่ 40°C มาความหนืดมูนนี้ด้วยเครื่องมูนนี้วิสโคมิเตอร์ ตามหัวข้อ 2.7.2.1 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.14 และสมบัติการไหลแบบเฉือนด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ตามหัวข้อ 2.7.2.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (shear rate, s^{-1}) กับความเค้นเฉือน (shear stress, Pa) ดังรูปที่ 3.15 และอัตราเฉือนกับความหนืดเฉือน (shear viscosity, Pa.s) ดังรูปที่ 3.16

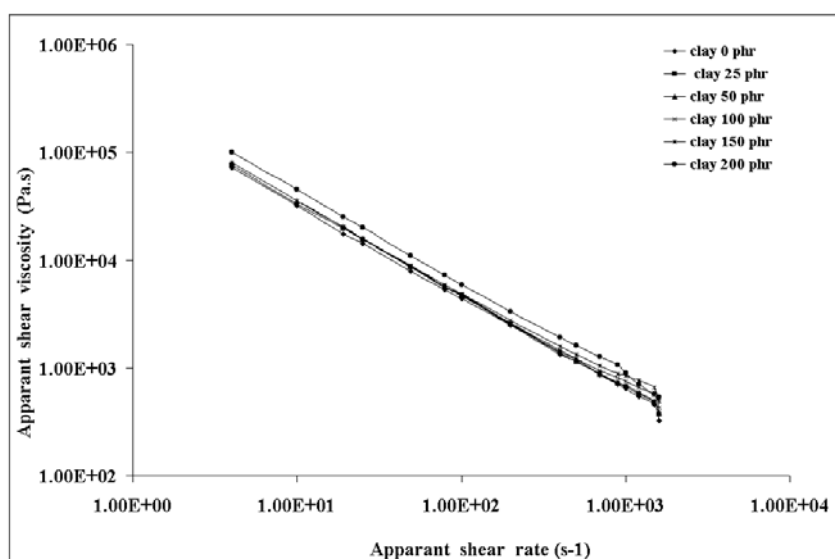


รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีหม้อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ กับสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.14 พบว่า ค่าความหนืดของยางธรรมชาติพอกไซค์ที่ 30 โมลเปอร์เซ็นต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเคลย์เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหม้อพอกไซค์ในโมเลกุลของยางธรรมชาติพอกไซค์และหมู่วัสดุที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ให้มากขึ้น ทำให้ความหนืดของยางผสมสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติพอกไซค์ ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.15-3.16 พบว่า ความข้นเหนียวและความหนืดเฉือนของยางเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเคลย์เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างหม้อพอกไซค์ของยางธรรมชาติพอกไซค์และหมู่ไฮดรอกซิลของสารตัวเติมเคลย์ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ยางยึดเหนี่ยวกับอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ได้ดีขึ้น ยางมีความต้านทานต่อการไหลแบบเฉือนเพิ่มขึ้น

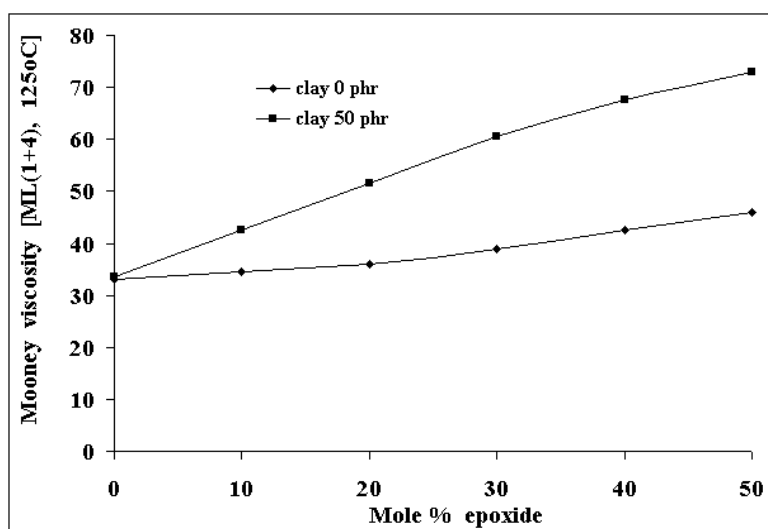
3.5 การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์ผสมสารเคมี

นำยางธรรมชาติพอกไซค์ที่เตรียมได้จากข้อ 2.5 (ส่วนที่ 1) มาผสมกับสารเคมีต่างๆ ในตารางที่ 2.4 โดยแปรปริมาณหม้อพอกไซค์และปริมาณเคลย์ แล้วนำยางผสมสารเคมีที่ได้มาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

3.5.1 อิทธิพลของปริมาณหม้อพอกไซค์

3.5.1.1 ความหนืดมูนนี้

นำยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่างๆ ผสมกับสารเคมีต่างๆ โดยใช้เคลย์ปริมาณ 0 และ 50 phr ตามสูตรดังตารางที่ 2.4 แล้วทดสอบความหนืดมูนนี้ของยางผสมสารเคมี ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.17

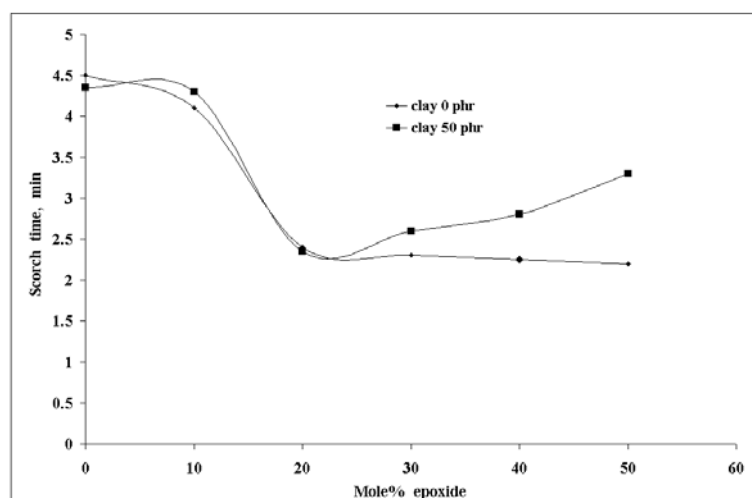


รูปที่ 3.17 ความหนืดมูนนี่ [ML (1+4), 125°C] ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆทั้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

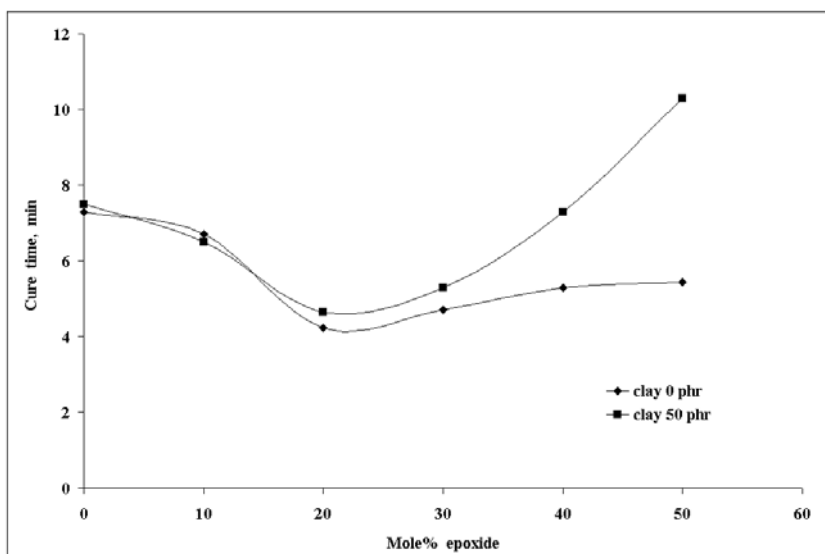
จากรูปที่ 3.17 พบว่า เมื่อปริมาณของหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดมูนนี่ของยางจะสูงขึ้นทั้งกรณีที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมเคลย์ 50 phr แต่สังเกตเห็นว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดมูนนี่กรณีที่ใช้สารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากสามารถอันตรกิริยาระหว่างหมู่อีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์และหมู่ไฮดรอกซิลของสารตัวเติมเคลย์ได้มากขึ้นดังรูปที่ 3.11

3.5.1.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์

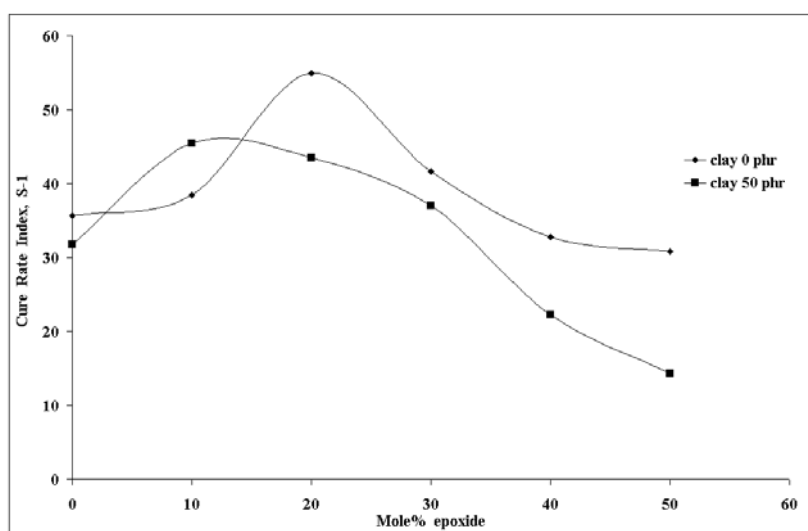
นำยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสารเคมีต่างๆ ตามสูตรในตารางที่ 2.4 โดยเปรียบเทียบกรณีที่ใช้สารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 0 และ 50 phr ทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานหมุน รุ่น ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 160°C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.18-3.21



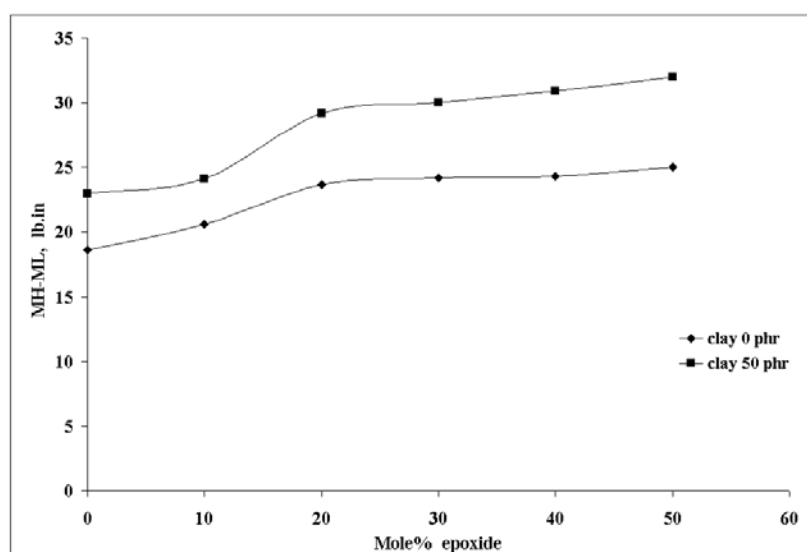
รูปที่ 3.18 เวลาสกอร์ชของยางผสมสารเคมีที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆทั้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมสารตัวเติมเคลย์ 50 phr



รูปที่ 3.19 เวลาการวัดคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมกับสารตัวเติมเคลย์ 50 phr



รูปที่ 3.20 ดัชนีการวัดคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมกับสารตัวเติมเคลย์ 50 phr



รูปที่ 3.21 ผลต่างของค่าทอร์กสูงสุดกับค่าทอร์กต่ำสุดของยางผสมสารเคมีที่ใช้ยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่างๆ ทั้งที่ไม่มีผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมสารตัวเติมเคลย์ 50 phr

จากรูปที่ 3.18 พบว่า ยางธรรมชาติพอกไซค์ที่ไม่มีสารตัวเติมเคลย์ จะมีเวลาที่สามารถแปรรูปได้ หรือเวลาการสกอซ (scorch time) ลดลงตามปริมาณหม้อพอกไซค์ เนื่องจากยางธรรมชาติพอกไซค์มีพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติ (Segequell *et al.*, 1999) ทำให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เร็วกว่ายางธรรมชาติ แต่เมื่อมีการใช้สารตัวเติมในสูตรยาง พบว่า เวลาที่สามารถแปรรูปได้ของยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับปริมาณหม้อพอกไซค์มากกว่า 20 โมลเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของหมู่ไซลานอลหรือหม้อพอกไซค์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งบางส่วนทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้ช้าลง

จากรูปที่ 3.19 พบว่า เวลาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติพอกไซค์จะมีค่าลดลง เมื่อยางธรรมชาติมีระดับของปริมาณหม้อพอกไซค์น้อยกว่า 20 โมลเปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณหม้อพอกไซค์บนโมเลกุลยางธรรมชาติมากกว่า 20 โมลเปอร์เซ็นต์ จะทำให้เวลาการวัลคาไนซ์ของยางเพิ่มขึ้น กล่าวคือปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้ช้าลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่หม้อพอกไซค์หรือหมู่ไซลานอลเกิดการดูดซับสารตัวเร่ง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการวัลคาไนซ์ พบว่า เวลาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติพอกไซค์จะเร็วกว่ายางธรรมชาติ (โดยเฉพาะที่มีหม้อพอกไซค์ต่ำกว่า 40 โมลเปอร์เซ็นต์) เนื่องจากการที่มีหม้อพอกไซค์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นหมู่ที่มีสภาพเป็นขั้ว โดยหมู่ดังกล่าวจะให้อิเล็กตรอนไปสู่พันธะคู่ของหน่วยไอโซพรีน (isoprene) ทำให้พันธะคู่มีความว่องไวต่อหมู่ที่ชอบขั้วมากขึ้น (Segequell *et al.*, 1999 และ Roy *et al.*, 1993)

จากรูปที่ 3.20 ในกรณียางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ พบว่า อัตราการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหม้อพอกไซค์ต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณหม้อพอกไซค์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงระดับ 20 โมลเปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ยางผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr ให้ผลในทำนองเดียวกัน แต่ให้อัตราการวัลคาไนซ์สูงสุดที่ระดับหม้อพอกไซค์ 10 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากหม้อพอกไซค์จะกระตุ้นความ

ว่องไวของพันธะคู่ในโมเลกุลยางธรรมชาติ แต่เมื่อปริมาณหมู่เอพอกไซด์เพิ่มขึ้นกว่านี้ ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ลดลง คาดว่าเกิดการดูดซับสารตัวเร่ง ทำให้สารตัวเร่งทำงานไม่เต็มที่ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีและมีสารตัวเติมปริมาณ 50 phr พบว่า ยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติเอพอกไซด์ที่ไม่มีสารตัวเติมเคลย์ มีอัตราการวัลคาไนซ์เร็วกว่ากรณีที่ใช้สารตัวเติมเคลย์ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของสารตัวเติมเคลย์เกิดการดูดซับสารตัวเร่ง

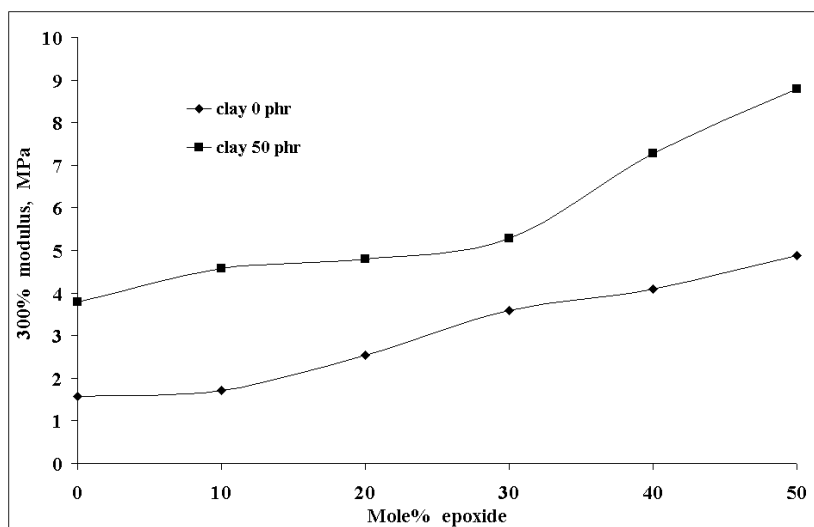
จากรูปที่ 3.21 พบว่า ผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุดของยางวัลคาไนซ์ พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณหมู่เอพอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วของหมู่เอพอกไซด์ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงบิดมากขึ้นเพื่อให้จานโลหะหมุนไปมา นอกจากนี้จากการศึกษาของ Alex *et al.*, 1989 และ Mohanty and Nando, 1997 พบว่า ในขณะหลอมวงแหวนเอพอกไซด์จะเกิดการเปิดออกกลายเป็นหมู่แอลกอฮอล์ชนิดตติยภูมิ (secondary and tertiary alcohol groups) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกันเองได้ดังรูปที่ 3.7

3.5.1.3 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

นำยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติเอพอกไซด์ที่มีหมู่เอพอกไซด์ต่างๆ ผสมกับสารตัวเติมเคลย์ 50 phr และสารเคมีอื่นๆ มาอัดเข้าขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮโดรลิกที่อุณหภูมิ 160°C ตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีแต่ละสูตร ตั้งแผ่นยางวัลคาไนซ์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำยางที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆต่อไป

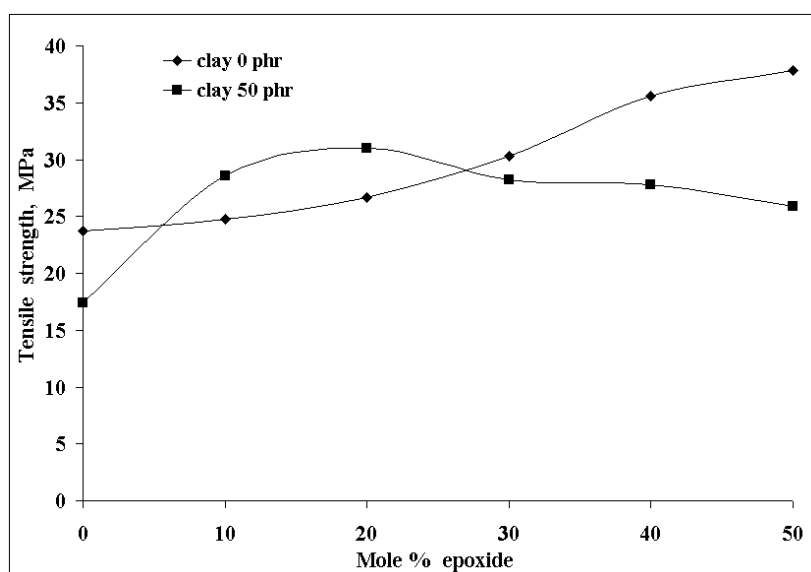
3.5.1.3.1 สมบัติด้านการดึง (Tensile properties)

นำยางวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติเอพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่เอพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr มาทดสอบสมบัติด้านการดึง ตามหัวข้อ 2.7.4.1 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.22-3.24



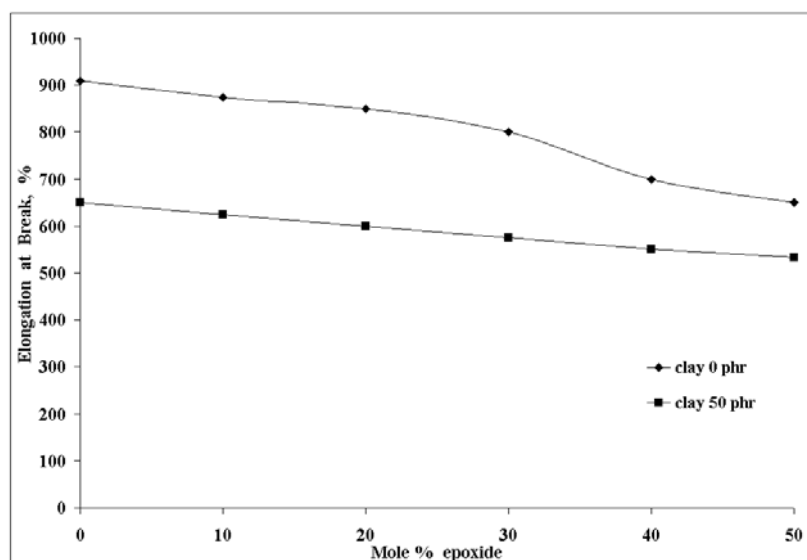
รูปที่ 3.22 ค่า 300% modulus ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีโมลเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.22 พบว่า ค่าความเค้นที่ระยะยืด 300 เปอร์เซนต์ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณหม้อพอกไซค์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากหม้อพอกไซค์ของยางธรรมชาติพอกไซค์สามารถเกิดอันตรกิริยากับหม้อพอกไซค์ด้วยตัวเองได้ ดังรูปที่ 3.7 และสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมูโซลานอลที่ผิวของสารตัวเติมเคลย์ ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งอันตรกิริยาดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณหม้อพอกไซค์เพิ่มขึ้น ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีค่าความแข็งตึง (stiffness) เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีหรือไม่มีสารตัวเติมเคลย์ พบว่า ค่าโมดูลัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมเคลย์ 50 phr



รูปที่ 3.23 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติพอกไซค์ชนิดต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.23 ในกรณีที่ใช้สารตัวเติมปริมาณ 50 phr พบว่า เมื่อปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้เพิ่มข้้น ค่าความต้านทานต่อแรงค้งของยางจะเพิ่มข้้นจนกระทั่งถึงระดับที่มีปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้ 20 โมลเปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงค้งของยางจะตกลงเมื่อปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้บนโมเลกุลยางเพิ่มข้้น เนื่องจากการที่มีหนุ่อกุ๊อไค้เพิ่มมากข้้น ทำให้ค่าอุณหภูมิกล่่ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของยางสูงข้้น ลักษณะการย้ดหย่นของยางลดลงทำให้การตกผลึกของยางลดลง ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงค้งลดลง (Davies *et al.*, 1983) ส่วนกรณีที่ไม่ม่สารตัวเติมเคลย์ พบว่า เมื่อปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้เพิ่มข้้น ทำให้ความต้านทานต่อแรงค้งมีค่าเพิ่มข้้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมเคลย์ พบว่า ยางธรรมชาติอือกุ๊อไค้ที่มีปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้ระหว่าง 10-20 โมลเปอร์เซ็นต์ การใช้สารตัวเติมเคลย์ในยางจะทำให้เกิดการเสริมแรงในยาง กล่าวคือ มีค่าความต้านทานต่อแรงค้งสูงกว่กรณีที่ไม่ม่สารตัวเติม แต่เมื่อปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้มากกว่า 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงค้งของยางมีค่าต่ำลง

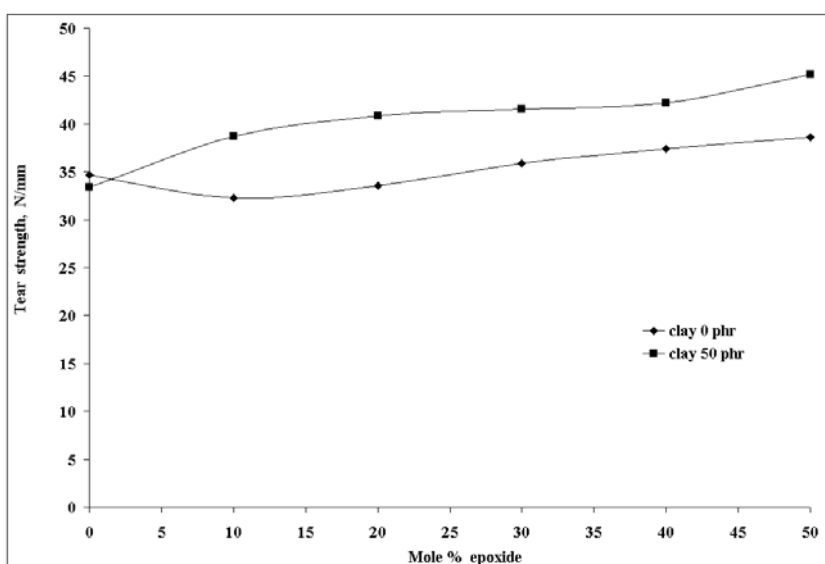


รูปที่ 3.24 ระยะย้ดสูงสุดของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอือกุ๊อไค้ที่มีปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้ต่าง ๆ ทั้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ และผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.24 พบว่า ความสามารถในการย้ดหรือระยะย้ดสูงสุดของยางวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติอือกุ๊อไค้ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr ลดลงตามปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้ที่เพิ่มข้้น เนื่องจากปริมาณหนุ่อกุ๊อไค้ในโครงสร้างของยางธรรมชาติเพิ่มข้้น ส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิกล่่ายแก้วของยางเพิ่มข้้น รวมทั้งเกิดอันตรกิริยาระหว่างหนุ่อกุ๊อไค้ของยางธรรมชาติอือกุ๊อไค้และหนุ่อกุ๊อไค้ที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ทำให้ลักษณะย้ดหย่นของยางลดลง (Davies *et al.*, 1983) ส่วนกรณีที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ลงไป ให้ผลในทำนองเดียวกัน โดยที่ระยะย้ดสูงสุดกรณีที่ไม่ม่สารตัวเติมจะมีค่าสูงกว่กรณีที่ใช้สารตัวเติมเคลย์ 50 phr

3.5.1.3.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

นำยางวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสม และผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr และสารเคมีอื่นๆ ตามตารางที่ 2.4 มาทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ตามหัวข้อ 3.7.4.2 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.25

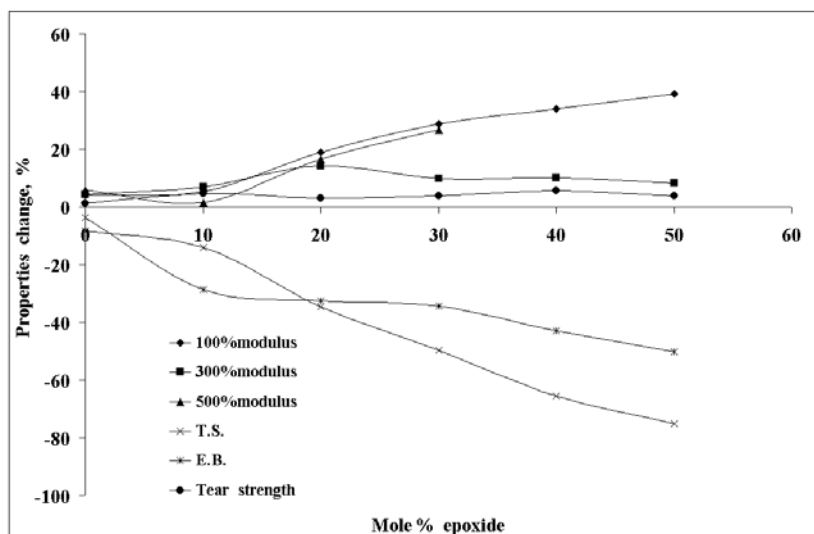


รูปที่ 3.25 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมและผสมกับสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

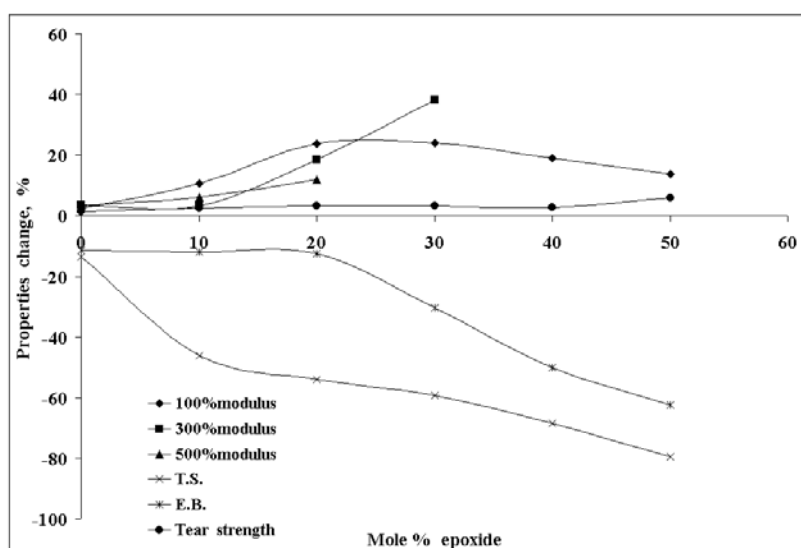
จากรูปที่ 3.25 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น และการเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างกันให้มากขึ้นด้วย ทำให้ต้องใช้แรงดึงสูงเพื่อให้ยางเกิดการฉีกขาด โดยที่ยางที่ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารตัวเติมเคลย์ ซึ่งแรงกระทำที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะหมู่ฟังก์ชันอีพอกไซด์ระหว่างโมเลกุลยาง

3.5.1.3.3 การทดสอบความทนทานต่อการบ่มเร่ง (Ageing Properties)

นำยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr และสารเคมีอื่นๆ ตามตารางที่ 2.4 ไปทดสอบความทนทานต่อการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C นาน 22 ชั่วโมง ตามวิธีการในหัวข้อ 2.7.4.4 แล้วรายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของการทดสอบก่อนและหลังบ่มเร่ง ได้ผลดังรูปที่ 3.26-3.27



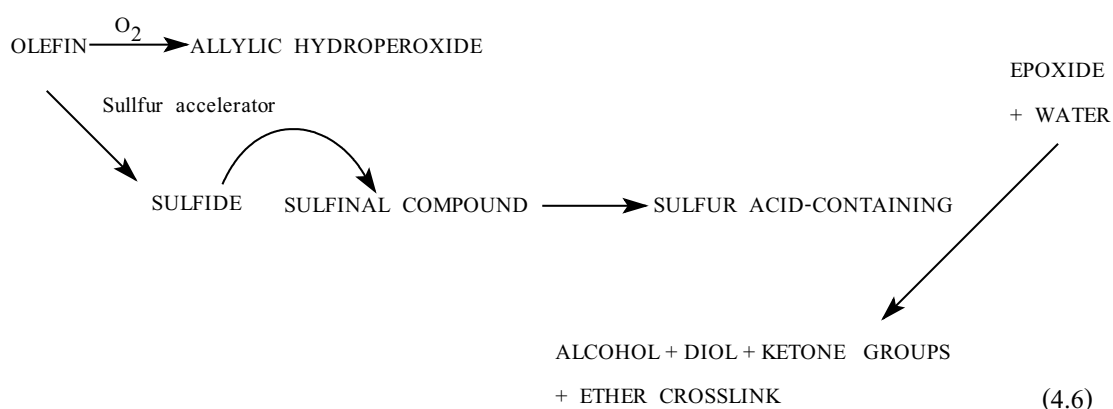
รูปที่ 3.26 การเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่พอกไซค์ต่างๆ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมเคลย์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 22 ชั่วโมง



รูปที่ 3.27 การเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่พอกไซค์ต่างๆ ผสมสารตัวเติมเคลย์ 50 phr ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 22 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.26-3.27 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นที่ระยะยืด 100, 300, และ 500 เปอร์เซนต์ และความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีค่าสูงขึ้น กล่าวคือ สมบัติหลังการบ่มเร่งของยางสูงกว่าสมบัติก่อนการบ่มเร่ง แต่สมบัติด้านความทนทานต่อการฉีก และความสามารถในการยืดหรือระยะยืดฉีกขาดมีค่าลดลง โดยยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่พอกไซค์ต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังการบ่มเร่งสูงกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มเร่งยางธรรมชาติพอกไซค์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน จะเกิดการ

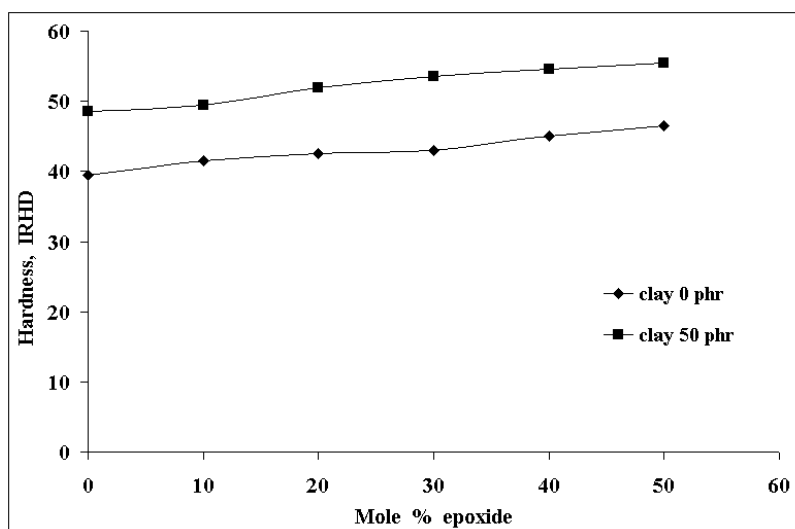
เปิดวงแหวนอีพอกไซด์เป็นแอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (Secondary amine) และตติยภูมิ (Tertiary amine) เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะอีเทอร์และไซคลิกอีเทอร์เกิดขึ้น (Roy *et al.*, 1993 และ Gelling and Morrison, 1985) โดยปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์จะมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.28 กรดที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดจากการแตกสลายด้วยความร้อนของออกซิไดซ์ซัลไฟด์ (oxidized sulphide) นอกจากนี้หมู่อีพอกไซด์ยังสามารถแตกตัวได้ง่ายแล้ว การมีหมู่อีพอกไซด์จะทำให้พันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลของยางเกิดความว่องไวต่อปฏิกิริยาการออกซิเดชันได้เร็วขึ้น



รูปที่ 3.28 ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ด้วยความร้อน (Baker and Gelling, 1987)

3.5.1.3.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

นำยางวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr มาทดสอบความแข็งของยางด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ IRHD ตามหัวข้อ 2.7.4.3 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.29

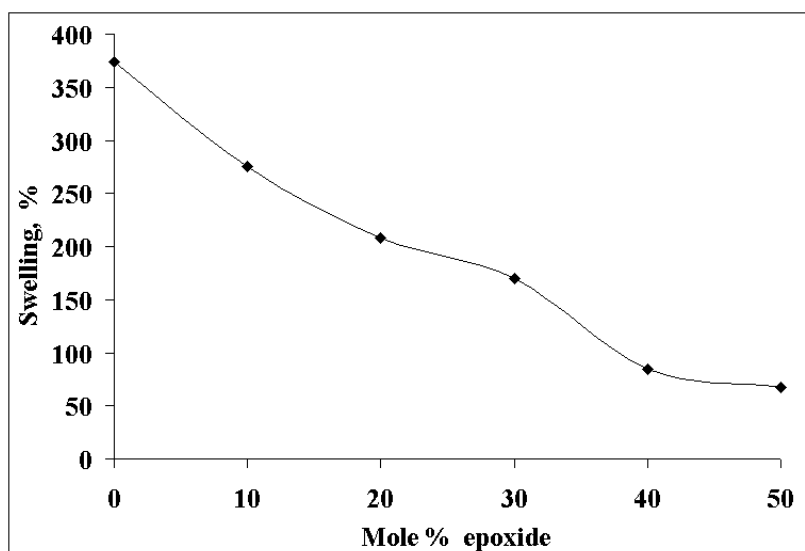


รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ทั้งที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.29 พบว่า ความแข็งของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีหมู่อีพอกไซด์ซึ่งมีสภาพขี้ว ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างของยางธรรมชาติทำให้ค่าอุณหภูมิกลายแก้วของยางเพิ่ม และยางวัลคาไนซ์มีความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าเกิดแรงกระทำระหว่างหมู่อีพอกไซด์และหมู่ไซลาลอนอลที่ผิวอนุภาคเคลย์ร่วมด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าความเค้นที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ของยางวัลคาไนซ์ และผลต่างของแรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุดที่ได้จากผลการทดลองในรูปที่ 3.21 และ 3.22 นอกจากนี้ยังพบว่า ยางที่ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr ให้ค่าความแข็งสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมเคลย์

3.5.1.4 สมบัติต้านความทนทานต่อการบวมพอง (Swelling Resistance)

นำยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr มาทดสอบความทนทานต่อการบวมพองในโทลูอีน โดยดำเนินการทดสอบตามหัวข้อ 2.7.5 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.30



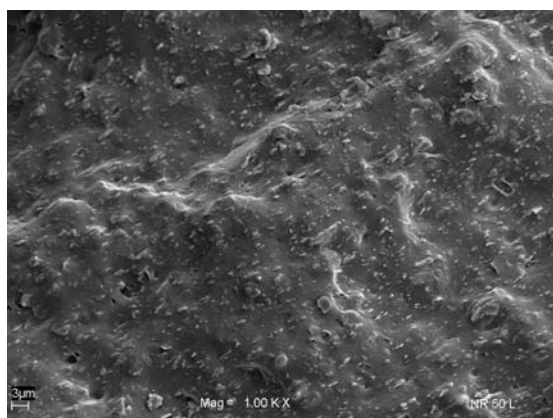
รูปที่ 3.30 เปรี่เซนต์การบวมพองในโพลูอินของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ผสมกับสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr

จากรูปที่ 3.30 พบว่า ความทนทานต่อการบวมพองในโพลูอินของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์มีความเป็นขั้วและสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮโดรเจนที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นทั้งระหว่างหมู่อีพอกไซด์ด้วยกันเองและกับหมู่ไฮโดรเจนที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ จะมีมากขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ รวมทั้งความเป็นขั้วที่มากขึ้น ทำให้ค่า Solubility parameter ของยางมีความแตกต่างจากโพลูอินมากขึ้น

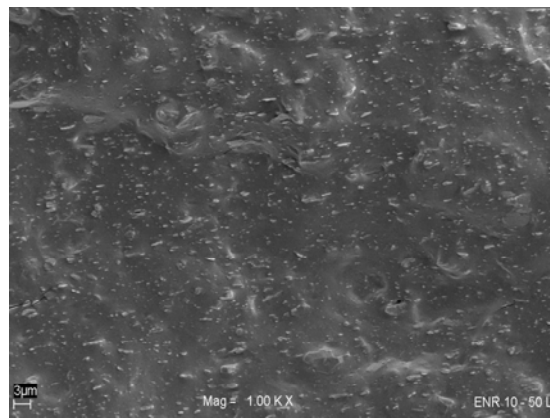
3.5.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology Properties)

นำยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ ผสมกับสารตัวเติมเคลย์ 50 phr มาทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยดำเนินการทดสอบตามหัวข้อ 3.7.6 เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของสารตัวเติมเคลย์ในยาง ได้ผลการทดสอบดังรูปที่

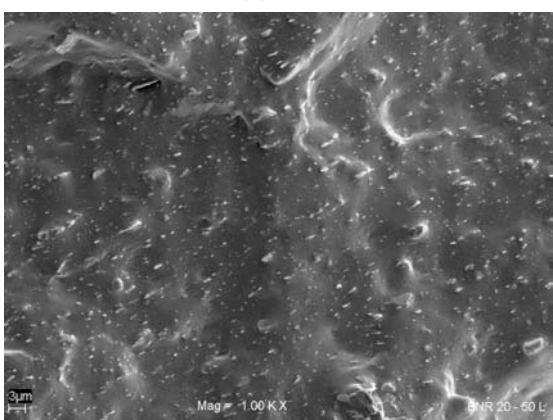
3.31



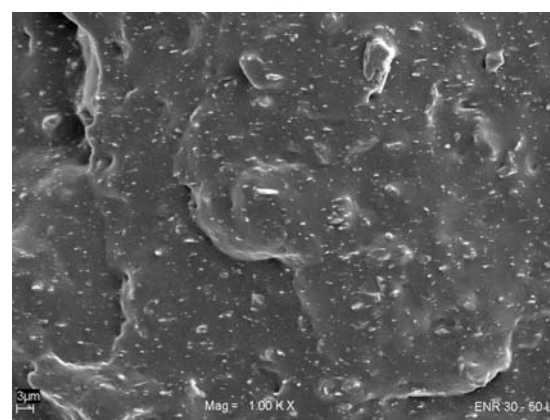
(ก)



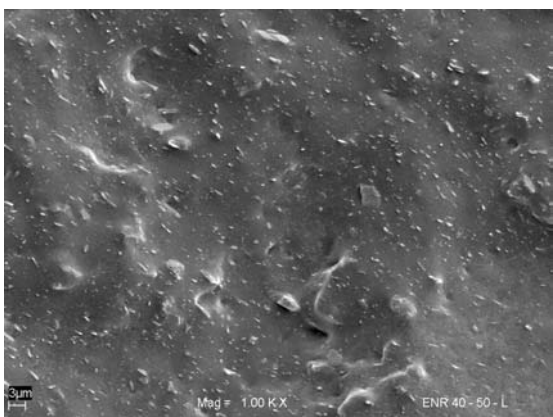
(ข)



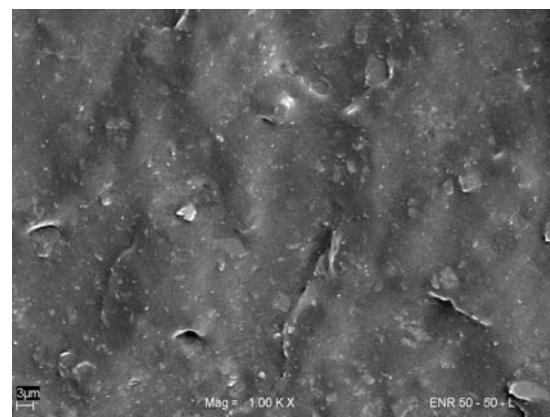
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3.31 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอโฟกไซต์ที่มีปริมาณหน่ออโฟกไซต์ต่างๆ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณ 50 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยที่ (ก) NR (ข) ENR-10 (ค) ENR-20 (ง) ENR-30 (จ) ENR-40 (ฉ) ENR-50

จากรูปที่ 3.31 พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมเคลย์ในยางมีความสม่ำเสมอ โดยเกิดการกระจายตัวทั่วแผ่นยาง สารตัวเติมเคลย์สามารถผสมในยางได้ดีโดยไม่เกิดการแยกชั้น แสดงให้เห็นว่าในชั้น

ตอนการผสมสารตัวเติมเคลย์ในน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ได้มีการกวนสารตัวเติมเคลย์ทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงในยาง ในกรณีที่ปริมาณหมู่อพอกไซค์มากขึ้นการกระจายตัวของสารตัวเติมเคลย์ในยางเกิดอย่างสม่ำเสมอ ไม่รวมกลุ่มกันเป็นก้อน

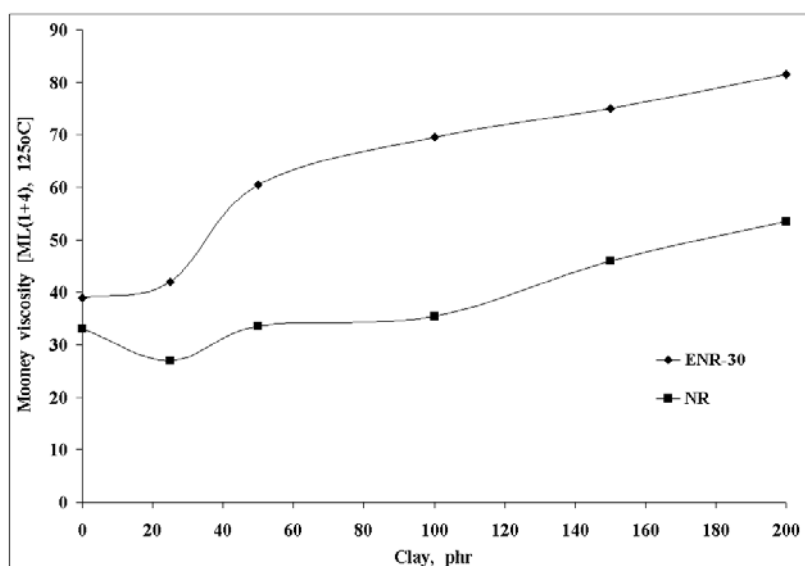
3.5.2 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมเคลย์

นำยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมกับสารตัวเติมเคลย์ ดังสูตรในตารางที่ 2.2 โดยแปรปริมาณของสารตัวเติมเคลย์ คือ 0, 25, 50, 100, 150 และ 200 phr โดยผสมยางดังกล่าวกับสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 2.4 แล้วเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมสารเคมี ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

3.5.2.1 ความหนืดมูนนี่

นำยางผสมสารเคมีที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.5 มาทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ ได้ผลการทดลองรูปที่

3.32



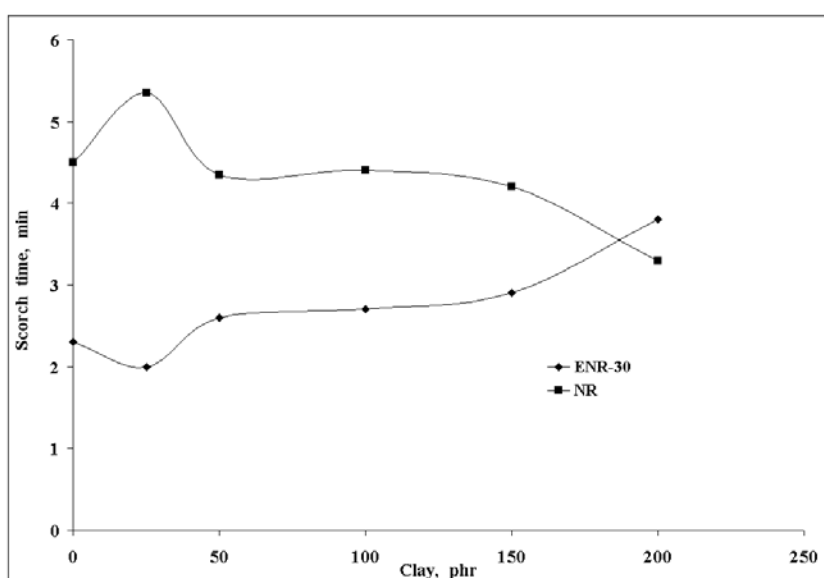
รูปที่ 3.32 ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.32 เป็นค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติปละยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่อพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยแปรปริมาณสารตัวเติมเคลย์ พบว่า ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติต่ำกว่ายางธรรมชาติอพอกไซค์ และเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมเคลย์ที่ใช้ เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันของหมู่อพอกไซค์ของยางธรรมชาติอพอกไซค์กับหมู่ไฮดรอกซิลของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้ยางมีความหนืดมากขึ้น ยางสามารถต้านทานต่อการไหลมากขึ้น และเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมเคลย์

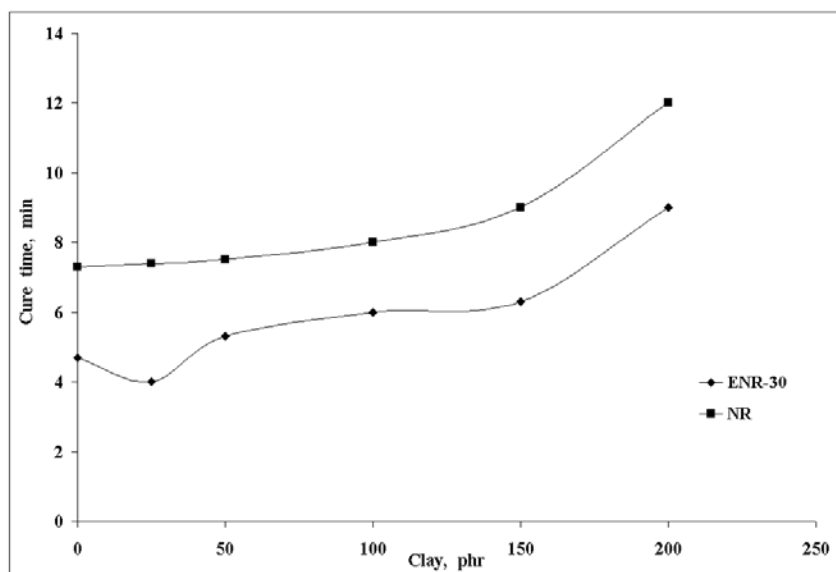
มากขึ้น ทำให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวให้สูงขึ้น แต่สังเกตเห็นว่า ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 50 phr ถ้าหากใช้มากกว่า 50 phr ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง

3.5.2.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์

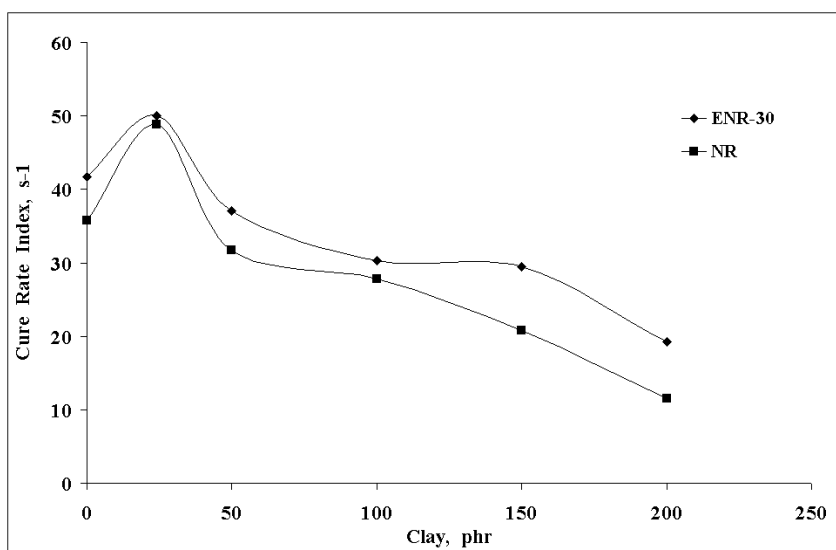
นำยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมกับสารเคมีอื่นๆ มาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานหมุน รุ่น ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 160 °C ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.33-3.36



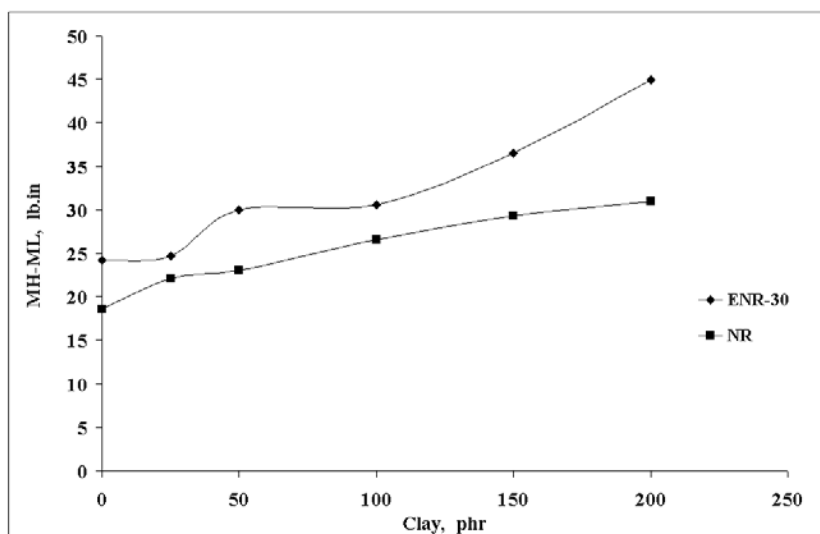
รูปที่ 3.33 เวลาสกอของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซค์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 3.34 เวลาการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 3.35 ดัชนีการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 3.36 ผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดกับค่าทอร์กต่ำสุดของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมือพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.33 กรณียางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมือพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ พบว่า ระยะเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้หรือเวลาสกอขมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมเคลย์ เนื่องจากการใช้สารตัวเติมเคลย์ปริมาณมากขึ้นจะเกิดการดูดซับสารตัวเร่ง ทำให้สารตัวเร่งทำงานได้ไม่เต็มที่ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติพอกไซค์ พบว่า ยางธรรมชาติมีเวลาที่สามารถแปรรูปได้นานกว่ายางธรรมชาติพอกไซค์ เนื่องจากยางธรรมชาติพอกไซค์มีหมือพอกไซค์บนโครงสร้างซึ่งสามารถให้อิเล็กตรอนไปสู่ตำแหน่งพันธะคู่ของหน่วยไอโซพรีนได้ ทำให้พันธะคู่ในโมเลกุลยางมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น

จากรูปที่ 3.34 พบว่า เมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์ปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้เวลาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมือพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลง เนื่องจากความเป็นขั้วและการดูดซับสารตัวเร่งของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 3.35 อัตราการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมือพอกไซค์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ 25 phr มีอัตราการวัลคาไนซ์จะเร็วขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเคลย์มากขึ้น ทั้งยางธรรมชาติและยางธรรมชาติพอกไซค์ที่มีปริมาณหมือพอกไซค์ต่างๆ พบว่า อัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเป็นขั้วและการดูดซับสารตัวเร่งของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้สารตัวเร่งทำงานไม่เต็มที่

จากรูปที่ 3.36 พบว่า ผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุดของยางวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติ มีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติพอกไซค์ และผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงบิดมากขึ้นเพื่อทำให้งานโลหะ

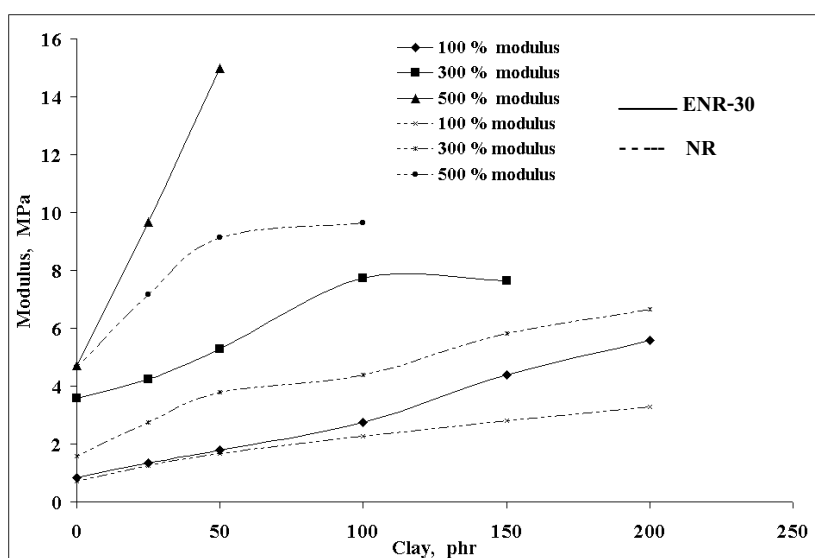
หมุนไปมา จากการศึกษากของ Manna, *et al.*, 1999 พบว่า สามารถเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่อิพอกไซด์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับหมู่วิธานอลที่ผิวอนุภาคของสารตัวเติมเคลย์ ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันจะมีมากขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมเคลย์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกันเองได้ดังรูปที่ 3.11

3.5.2.3 สมบัติทางกายภาพ

นำยางผสมสารเคมีที่เตรียมจากยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมกับสารตัวเติมเคลย์ปริมาณปริมาณต่างๆ มาอัดเข้าขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮโดรลิก ที่อุณหภูมิ 160°C ตามระยะเวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีแต่ละสูตร เก็บแผ่นยางที่ได้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัดเป็นชิ้นทดสอบและนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ให้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.5.2.3.1 สมบัติด้านการดึง (Tensile Properties)

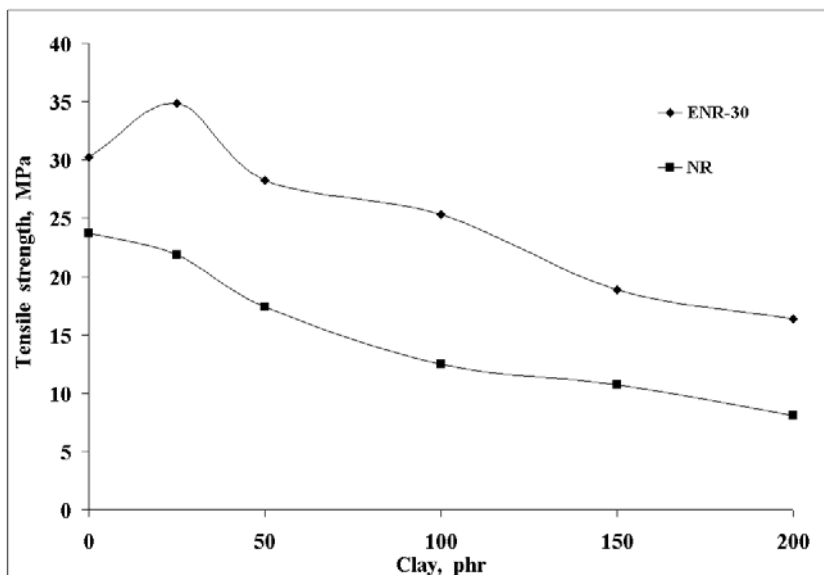
นำยางวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ มาทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามหัวข้อ 2.7.4.1 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.37-3.39



รูปที่ 3.37 ค่าความเค้นที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.37 พบว่า ค่าความเค้นที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างหมู่อิพอกไซด์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับหมู่วิธานอลของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้ยางมีความแข็งตึง (stiffness) มากขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ พบว่า ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าโมดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติ ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 3.38 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสมสารตัวเติมเคลย์ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.38 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเคลย์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 25 phr หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมเคลย์ในอย่างมากกว่า 25 phr จะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของยางลดลง เนื่องจากการใช้สารตัวเติมเคลย์ที่มากขึ้น ทำให้ความยืดหยุ่นของยางลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ พบว่า ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่อิพอกไซด์ด้วยกันเอง และหมู่อิพอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของสารตัวเติมเคลย์ ทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น