



## รายงานวิจัย

กาวไม้จากยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ไฮโดรต์ผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์  
Wood Adhesive Based on Maleic Anhydride Grafted Reclaim  
Rubber/Epoxidized Natural Rubber Blends

อุไรวรรณ สุกยั้ง	Uraiwan Sookyung
จุฑาทิพย์ อัจฉมภู	Jutatip Artchomphoo
สุรเดช มัจฉาเวช	Suradet Matchawet

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับเงินสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2562

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2562 เป็นงานวิจัยเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อการพัฒนาต่อยอดสู่อุตสาหกรรมด้านยางพารา

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทั้งความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ ตลอดจนคำแนะนำในการทำการวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ที่ให้การช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัยที่ช่วยในการวิจัยครั้งนี้ลุล่วงได้ด้วยดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจาก ความกรุณาของท่านและหน่วยงาน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

อุไรวรรณ สุขยัง  
จุฑาทิพย์ อาจชมภู  
สุรเดช มัจฉาเวช  
กันยายน 2562



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำกาบไม้จากยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอนด์ไฮโดรด์ผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทำการศึกษาศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ อิทธิพลปริมาณของมาลิกแอนด์ไฮโดรด์ในการกราฟต์ยางรีเคลม และอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ต่อสมบัติของกาบไม้ พบว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาบที่ดีที่สุดเมื่อใช้รีเคลมที่ปริมาณ 20 phr นอกจากนั้นพบว่ามาลิกแอนด์ไฮโดรด์ในการกราฟต์ยางรีเคลมในปริมาณ 4 phr ช่วยปรับปรุงสมบัติสมบัติของกาบยางได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างยางรีเคลมและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และจากการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์พบว่ายางวัลคาไนซ์ด้วยระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะให้ผลสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาบที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและระบบประสิทธิภาพ อธิบายได้จากระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะเกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิกซึ่งทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลและต้านทานต่อแรงเฉือนของกาบที่ดี

**คำสำคัญ:** ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยางรีเคลม ยางธรรมชาติ กาบไม้



## Abstract

This research aims to examine the preparation of wood adhesive from maleic anhydride grafted reclaim rubber/epoxidized natural rubber blends. The influences of blend ratio between reclaim rubber and epoxidized natural rubber, content of maleic anhydride grafted onto reclaim rubber and vulcanization system of rubber on wood adhesive properties were investigated. The best properties (i.e., mechanical properties and shear strength) were found with loading levels of reclaim rubber at 20 phr. Moreover, maleic anhydride grafted reclaim rubber by using maleic anhydride at 4 phr improved properties of wood adhesive because of good interaction between reclaim rubber and epoxidized natural rubber. For vulcanization system of rubber, it was found that the conventional vulcanization system (CV) exhibited the highest shear strength when compared with semi-efficiency (semi-EV) and efficiency vulcanization system (EV). This might be attributed to the effect of high proportion of polysulfidic crosslinks in CV as they tend to show greater mechanical properties and shear strength.

**Keywords:** epoxidized natural rubber, reclaim rubber, natural rubber, wood adhesive





## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.2.1 กาว (adhesive)	1
1.2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber; ENR)	5
1.2.3 ยางรีเคลม (Reclaim Rubber)	8
1.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
1.3 วัตถุประสงค์	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
บทที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย	12
2.1 ยางและสารเคมี	12
2.2 อุปกรณ์	12
2.3 การทดสอบ	12
2.4 วิธีการทดลอง	15
2.4.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อสมบัติของกาวไม้	15
2.4.2 การศึกษาอิทธิพลปริมาณของมาลิกแอนด์ไฮโดรด์ในการกราฟต์ยางรีเคลมต่อสมบัติกาวไม้	16
2.4.3 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิกแอนด์ไฮโดรด์	16
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	17
3.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์	17
3.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์	17
3.1.2 ความหนืดมูนนี่	17
3.1.3 สมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4 สมบัติเชิงกล	19
3.1.5 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว	22
3.2 ศึกษาอิทธิพลปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ในการกราฟต์ยางรีเคลมต่อสมบัติของกาวไม้	24
3.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	24
3.2.2 สมบัติการวัลคาไนซ์	25
3.2.3 ค่าความหนืดมุนี	26
3.2.4 สมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง	27
3.2.5 สมบัติเชิงกล	28
3.2.6 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว	31
3.3 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์	33
3.3.1 สมบัติการวัลคาไนซ์	33
3.3.2 ค่าความหนืดมุนี	34
3.3.3 สมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง	34
3.3.4 สมบัติเชิงกล	36
3.3.5 สมบัติการ	39
บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	41
4.1 สรุปผลการทดลอง	41
4.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	การใช้สารอีพอกไซด์แต่ละชนิดในปฏิกิริยาออกซิเดชันแสดงดังตารางนี้	6
ตารางที่ 2.1	สูตรยางคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่สัดส่วนต่างๆ	15
ตารางที่ 2.2	สูตรยางคอมปาวด์ที่มีการแปรระบบการวัลคาไนซ์	16
ตารางที่ 3.1	สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	17
ตารางที่ 3.2	สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	20
ตารางที่ 3.3	สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	26
ตารางที่ 3.4	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	29
ตารางที่ 3.5	สมบัติลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	34
ตารางที่ 3.6	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	36
ตารางที่ 3.7	สมบัติพื้นฐานของกาวยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวยาง (มอก.521-2527)	40

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 Lab/Overlap Joint	3
ภาพที่ 1.2 Joggle Lab Joint	3
ภาพที่ 1.3 Butt Joint	3
ภาพที่ 1.4 Scarf Joint	4
ภาพที่ 1.5 การดึงในแนวตั้งฉากกับการตัดยึด	4
ภาพที่ 1.6 การดึงในแนวระนาบที่ขนานกับการยึดติด	4
ภาพที่ 1.7 แร้งแยก	4
ภาพที่ 1.8 การดึงลอก	5
ภาพที่ 1.9 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	6
ภาพที่ 1.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $T_g$ กับจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์	7
ภาพที่ 1.11 การทำลายพันธะกำมะถันด้วยความร้อนและแรงเฉือน	8
ภาพที่ 3.1 ความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	18
ภาพที่ 3.2 ความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	19
ภาพที่ 3.3 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	19
ภาพที่ 3.4 ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดจนขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	20
ภาพที่ 3.5 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลม โดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	21
ภาพที่ 3.6 ความแข็งของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	21
ภาพที่ 3.7 ความต้านทานต่อการฉีกขาด ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	22
ภาพที่ 3.8 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr	23
ภาพที่ 3.9 สเปกตรัม ATR-FTIR ของยางรีเคลมและยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณต่างๆ	24
ภาพที่ 3.10 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.11 ความหนืดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	26
ภาพที่ 3.12 ความทนทานต่อบวมพองของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสมผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	27
ภาพที่ 3.13 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	28
ภาพที่ 3.14 ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดจนขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	29
ภาพที่ 3.15 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	30
ภาพที่ 3.16 ความแข็งของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	30
ภาพที่ 3.17 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	31
ภาพที่ 3.18 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr	32
ภาพที่ 3.19 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	33
ภาพที่ 3.20 ความหนืดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	34
ภาพที่ 3.21 ความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	35
ภาพที่ 3.22 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	35
ภาพที่ 3.23 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	37



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.24 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยึด 100% และ 300% ของยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กิ่ง ประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	37
ภาพที่ 3.25 ความแข็งของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วย ระบบปกติ (CV), กิ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	38
ภาพที่ 3.26 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กิ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และ ประสิทธิภาพ (EV)	38
ภาพที่ 3.27 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กิ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)	39





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำยางไปใช้ประโยชน์มีหลากหลายด้าน เนื่องจากยางสมบัติมีความยืดหยุ่นสูง ความทนทานต่อแรงดึง และที่สำคัญคือสมบัติการเหนียวติดกันดี ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้ยางเป็นที่นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์กาวอย่างกว้างขวาง โดยกาความเป็นวัสดุสำหรับการเชื่อมติดที่สำคัญในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมไม้ที่ต้องใช้กาวเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่กาวไม้ที่ใช้ นั้น ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์และมีต้นทุนที่สูง จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำกาวไม้จากยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีโครงสร้างที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับวัสดุไม้ซึ่งเป็นวัสดุประเภทมีขั้วให้ดีขึ้น จึงทำการดัดแปรโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ซึ่งยาง ENR มีโครงสร้างความเป็นขั้ว เช่นเดียวกับไม้ที่มีความเป็นขั้ว จึงทำให้สามารถช่วยในการยึดติดกันได้ดีมากยิ่งขึ้น และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตกาวจึงคิดที่นำยางรีไซเคิลซึ่งเป็นของเสียจากยางมาใช้ การนำยางรีไซเคิลมาใช้นอกจากจะช่วยในการลดต้นทุนการผลิตแล้ว ยังเป็นการช่วยลดขยะที่เกิดจากยางซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

การรีไซเคิลเป็นกระบวนการเปลี่ยนยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว (เกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ) โดยใช้สารเคมีและความร้อนตัดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง ให้เกิดเป็นยางที่มีสมบัติที่ไหลและขึ้นรูปใหม่ได้ โดยขั้นตอนของกระบวนการรีไซเคิลจะเป็นการแยกเอาชิ้นส่วนต่างๆ ของยางล้อที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ เช่น ขอบลวด ออกไปก่อน แล้วนำส่วนของดอกยางและแก้มยางที่สามารถรีไซเคิลได้ไปบดให้ละเอียดและนำไปผ่านกระบวนการดีวัลคาไนซ์ (devulcanization process) เพื่อตัดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลยาง พร้อมทั้งกำจัดสิ่งเจือปนออก และรีดเป็นแผ่นในขั้นตอนสุดท้าย โดยองค์ประกอบหลักในยางรีไซเคิลคือยางธรรมชาติทำให้ยางรีไซเคิลมีความเป็นขั้วต่ำ ในการนำมาเตรียมกาวไม้ ยางรีไซเคิลจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการเพิ่มความเป็นขั้วโดยผ่านกระบวนการกราฟต์ด้วยโมเลกุลกลุ่มที่มีความเป็นขั้ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดกับไม้

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการเตรียมกาวไม้จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีไซเคิลกราฟต์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (MA-g-reclaim) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อยางรีไซเคิล ผลของปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ ผลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ และสมบัติของกาวไม้

#### 1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 1.2.1 การ (adhesive)

การติดประสาน (adhesion) เป็นกรรมวิธีที่ทำให้วัสดุที่เป็นของแข็งติดเข้าด้วยกันหรือให้วัสดุเชื่อมติดกันด้วยกาว ในการติดส่วนใหญ่ต้องเตรียมผิวให้สะอาดและขรุขระหรือเรียบเสมอกัน ความแข็งแรงของการติดกันนั้นอาจต้องใช้เวลา ความร้อน แรงกด หรือการแนบของวัสดุทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของงานและชนิดของกาวที่ใช้เชื่อมติด กาวส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภทพอลิ

เมอร์ในอดีตเราใช้กาวที่ได้จากธรรมชาติ เช่น เคซีนในน้ำนม น้ำยาง ต้นไม้ แป้ง สารที่สกัดจากเกล็ดปลา ไชขาว หรือเขาสัตว์ แต่กาวที่ใช้กันมากในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยจะมีทั้งชนิดที่เป็นเทอร์โมพลาสติก(thermoplastic) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ แข็งมีการยึดติดที่ดีที่อุณหภูมิห้องอ่อนตัวได้เมื่อโดนความร้อน หรืออาจจะเป็นชนิดเทอร์โมเซต (thermoset) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แข็งที่มีความคงทนต่อความร้อนและไม่ละลายในตัวทำละลาย

### **ประเภทของกาว**

กาวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. กาวธรรมชาติ (Natural Adhesives) กาวธรรมชาติส่วนใหญ่ได้จากพืช เช่น ยางเหนียวของต้นไม้ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่ง หรือจากสัตว์ เช่นกาวที่ผลิตขึ้นจากหนังและกระดูกสัตว์ซึ่งโดยปกติกาวที่ได้จากธรรมชาติจะมีความแข็งแรงและความต้านทานต่ำกว่ากาวที่ได้จากการสังเคราะห์

2. กาวสังเคราะห์ (Synthesis Adhesives) กาวชนิดนี้ผลิตจากพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตหรือเทอร์โมพลาสติก ซึ่งกาวประเภทเทอร์โมเซตจะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวหรือละลายได้อีก หลังจากได้รับการอบด้วยความร้อนแล้ว แต่กาวประเภทเทอร์โมพลาสติกสามารถทำให้อ่อนตัวได้อีกโดยการให้ความร้อนอีกครั้งหรือด้วยตัวทำละลาย

### **ส่วนประกอบของกาว**

1. พอลิเมอร์ (polymer) เป็นสารที่ทำให้เกิดการยึดติดวัสดุเข้าด้วยกันซึ่งสารที่ใช้เป็นเนื้อกาวอาจ แบ่งได้ตามลักษณะดังนี้ สารธรรมชาติ ได้แก่ ที่ได้จากพืช จากสัตว์ และสารอื่นๆ เช่น ยางมะตอย เซลแลค ยางธรรมชาติ เป็นต้น สารสังเคราะห์ ได้แก่ สารพวก Thermoplastic resin เช่น cellulose ester and ester, alkyd and acrylic esters, polyamide และสารพวกยางสังเคราะห์ เช่น neoprene, nitrile, polysulphide

2. ตัวกระตุ้น (activator) เป็นสารเคมีที่เติมลงบนผิววัสดุโดยตรงหรือสามารถผสมกับกาวเพื่อเพิ่มการแห้งของกาวได้เร็วขึ้น

3. สารเร่งปฏิกิริยา (catalysts/accelerators) เป็นสารเคมีที่ใช้ในปริมาณน้อยเป็นตัวเร่งเพื่อให้กาวเกิดการแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง

4. สารทำให้คงรูป (curing agent) เป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อให้กาวเกิดการแข็งตัวและมีโครงสร้างแบบเชื่อมโยงสามมิติ

5. สารอื่นๆ เช่น สารป้องกันการแข็งตัว ป้องกันเชื้อรา สารป้องกันการติดไฟ และสี

6. สารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) เป็นสารเคมีที่เติมเพื่อป้องกันการเปราะของกาว กาวหลายชนิดมีความแข็งแรงสูง แต่หากอยู่ในสภาวะที่ได้รับแรงกดสูง กาวก็มีโอกาสที่จะเกิดการแตกได้ พลาสติกไซเซอร์ช่วยทำให้กาวนิ่มมากขึ้นเพื่อลดความเปราะของกาว

7. ตัวทำละลาย (solvents) เป็นของเหลวที่เติมลงไปเพื่อให้กาวกระจายหรือแขวนลอยอยู่ในรูปของเหลวเพื่อที่จะให้กาวเปียกบนผิววัสดุได้ง่ายขึ้น ซึ่งตัวทำละลายจะระเหยออกจากกาวภายหลังการทา หรือในขณะที่กาวกำลังเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างแบบสามมิติ

8. แทคคิไฟเออร์ (tackifier) ใช้เติมในกาวบางประเภทเท่านั้น โดยใช้ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความเหนียวหรือเพิ่มความสามารถในการเกาะติด แทคคิไฟเออร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

- Rosin resins เป็นสารที่ใช้เป็นแทคคิไฟเออร์สำหรับอุตสาหกรรมกาว มีอยู่ 3 ชนิดที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือ gum rosin, wood rosin และ tall oil rosin สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์

- Hydrocarbon resins สำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมกาวแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ C5 aliphatic resins, C9 aromatic resins และ C5/C9 aliphatic/aromatic resins

- Terpene resin แหล่งกำเนิดมาจากไม้ และพืชจำพวกมะนาว

### 1.2.1.1 รูปแบบของการติดประสาน (type of joint)

ความกว้างและความลึกของชิ้นงานที่จะใช้ติดกาวสามารถแบ่งรูปแบบของการติดประสานกาวกับวัสดุได้เป็น 3 แบบดังนี้ (<http://www.gluguru.com>, 2005)

1. Lab/Overlap Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่วางวัสดุสองชิ้นมาทับกัน



ภาพที่ 1.1 Lab/Overlap Joint

2. Joggle Lab Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่คล้ายกับ Overlab Joint แตกต่างกันตรงที่ Joggle Lab Joint เป็นรอยต่อบริเวณข้อต่อ



ภาพที่ 1.2 Joggle Lab Joint

3. Butt Joint เป็นลักษณะของรอยต่อที่ปลายของทั้งสองวัสดุ



ภาพที่ 1.3 Butt Joint

#### 4. Scarf Joint เป็นรอยต่อแบบ Butt Joint ที่มีมุมเข้ามาเกี่ยวข้อง



ภาพที่ 1.4 Scarf Joint

##### 1.2.1.2 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดติด

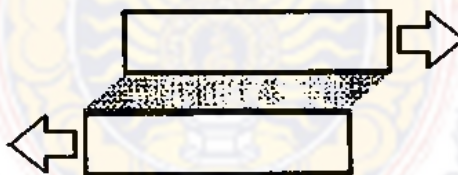
กาวที่ติดจะต้องมีความต้านทานการแยกกันเนื่องมาจากแรงกระทำในลักษณะต่างๆตามสภาพการใช้งาน ดังนั้นก่อนทำการผลิตเพื่อจำหน่าย ผู้ผลิตกาวจึงมักทำการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดโดยใช้แรงดึงแบบต่างๆ เพื่อให้ได้กาวที่มีคุณภาพเหมาะสมกับความต้องการ

1. การดึงในแนวตั้งฉากกับการติดยึด (tensile) โดยใช้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการติดยึดทั้งหมด



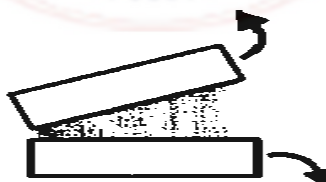
ภาพที่ 1.5 การดึงในแนวตั้งฉากกับการติดยึด

2. การดึงในแนวระนาบที่ขนานกับการยึดติด (shear) โดยให้แรงดึงกระจายพื้นที่ที่เกิดการติดยึดทั้งหมด



ภาพที่ 1.6 การดึงในแนวระนาบที่ขนานกับการยึดติด

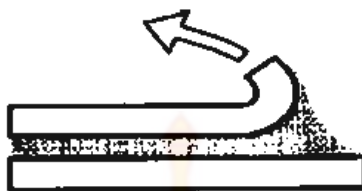
3. แรงแยก (cleavage) โดยให้แรงในการแยกเฉพาะบริเวณขอบของการติดยึดเท่านั้น



ภาพที่ 1.7 แรงแยก



4. การดึงลอก (peel) เมื่อมีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดที่มีผิวที่มีความยืดหยุ่นสูง



ภาพที่ 1.8 การดึงลอก

### 1.2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber; ENR)

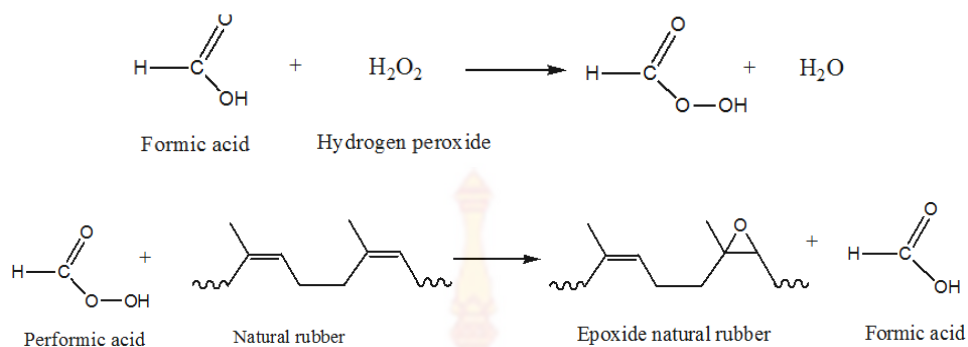
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) เตรียมได้จากการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติด้วยกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) เช่น กรดเปอร์อะซิติก (peracetic) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับกรดฟอร์มิก ยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเตรียมได้ทั้งในรูปแบบน้ำยางและยางแห้ง แต่ในทางการค้านิยมใช้ในรูปแบบน้ำยาง ซึ่งโครงสร้างและกลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปัจจุบันมียางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์เช่น Epoxyrene 25 Epoxyrene 50 มีระดับการเกิดอีพอกซิเดชันร้อยละ 25 (ENR 25) และร้อยละ 50 (ENR 50)

#### 1.2.2.1 ลักษณะทางเคมีของปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ ใช้กรดเปอร์อะซิติกหรือกรดเปอร์ฟอร์มิก วิธีการอาจจะเตรียมเปอร์ออกไซด์ก่อนหรือจะให้เกิดเปอร์ออกไซด์ขณะทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน อัตราส่วนโดยโมลของกรดเปอร์ฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.5 การเกิดเปอร์ออกไซด์ในขณะทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันแสดงดังในปฏิกิริยาในภาพที่ 2.5 ซึ่งการดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติจากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้อาจจะทำในสภาวะสารละลายหรือสภาวะน้ำยาง

สภาวะสารละลาย (Solution state) โดยกรดเปอร์เบนโซอิก (Perbenzoic acid) กรดเปอร์พะทาลิก (Perphthalic acid) หรือสารละลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกรดอะซิติก ที่มีกรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก เป็นสารเร่งปฏิกิริยา

สภาวะน้ำยาง (Latex state) โดยทั่วไปนิยมใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน เปอร์ออกไซด์ที่ใช้คือ กรดเปอร์อะซิติกและกรดเปอร์ฟอร์มิก ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เปอร์ออกไซด์จะให้ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ค่อนข้างสูง การทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันในสภาวะน้ำยางจะมีความสะดวก ปลอดภัยจากตัวทำละลายจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงจากการเกิดวงแหวนอีพอกไซด์ค่อนข้างน้อยจึงนิยมใช้วิธีนี้มากกว่า



ภาพที่ 1.9 ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Baker and Gelling, 1987)

ตารางที่ 1.1 การใช้สารออกไซด์แต่ละชนิดในปฏิกิริยาออกซิเดชันแสดงดังตารางนี้

สารออกไซด์	อีลาสโตเมอร์	สถานะของปฏิกิริยา
Benzoyl peroxide	Polyisoprene	สารละลาย
Perbenzoic acid	Polybutadiene, natural rubber	สารละลาย
Hydrogen peroxide + acetic acid	Polybutadiene, natural rubber	สารละลาย
Hydrogen peroxide + formic acid	Polybutadiene, natural rubber, EPDM, SBR	สารละลายและ Latex
Hydrogen peroxide + formic acid + a second acid	SBR, natural rubber	สารละลายและ Latex

ในกรณีการใช้กรดอะซิติกจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซัลฟูริกหรือกรดซัลโฟนิกเพื่อช่วยให้เกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะต้องควบคุมสถานะของปฏิกิริยาอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ การแตกของหมู่อีพอกไซด์อย่างง่ายจะได้ไกลคอล (Glycol) และไฮดร็อกซีเอสเทอร์ (Hydroxyester) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่ติดกันเมื่อเกิดการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์จะได้ไซคลิกอีเธอร์ (Cyclic ether) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก

### 1.2.2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

1. สเตอริโอเคมี (Stereochemistry) ยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกรดเปอร์ออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาเคมีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสเตอริโอเคมีของโมเลกุล ดังนั้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จะยังคงมีลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ ซิส-1,4 ทั้งหมด

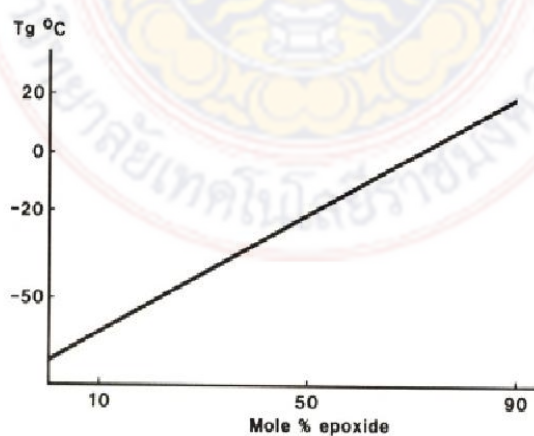


2. การกระจายของหมู่อีพอกไซด์ (Epoxyde distribution) การกระจายของหมู่อีพอกไซด์ตลอดความยาวของโซ่โมเลกุลจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นอย่างมาก ถ้าให้การเกิดอีพอกซิเดชันตรงตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาตินั้นเกิดแบบสุ่มและไม่มีการควบคุม พบว่าเมื่อระดับการเกิดอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้นการจัดเรียงตัวของหน่วยอีพอกไซด์และหน่วยโอลิฟิน แบบ O-E-O จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โมล จากนั้นการจัดเรียงตัวแบบ O-E-O จะลดลง ที่ระดับการเกิดอีพอกซิเดชันสูงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีการจัดเรียงตัวแบบ E-E-E เกิดขึ้นด้วย ซึ่งการจัดเรียงตัวแบบนี้เพิ่มขึ้นอย่างมากและมากกว่าการจัดเรียงตัวแบบอื่น และเมื่อการเกิดอีพอกซิเดชันสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โมลซึ่งนอกจากการคำนวณแล้วยังสามารถวัดลำดับการจัดเรียงตัวของหน่วยอีพอกไซด์ (Epoxyde unit, E) และหน่วยโอลิฟินของการเกิดอีพอกซิเดชันใน ENR-25 และ ENR-50 ได้

### 1.2.2.3 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

1. ความเหนียวและความสามารถในการละลาย ENR-25 และ ENR-50 มีค่าความเหนียวอยู่ในช่วง 75-90 หน่วย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องบดก่อนที่จะนำไปผสมกับสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีสภาพความเป็นขี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ สำหรับความสามารถในการละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะขึ้นอยู่กับระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันและชนิดของตัวทำละลาย ซึ่งยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถละลายได้ง่ายขึ้นหากมีการบดขยี้ก่อนตัวทำละลายที่เหมาะสมได้แก่ ทูโลอิน คลอโรฟอร์มและเตตราไฮโดรฟูเรน

2. อุณหภูมิคล้ายแก้ว การเกิดหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์โมลบนโมเลกุลยางธรรมชาติ จะทำให้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ  $1^{\circ}\text{C}$  ดังภาพที่ 1.10 ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ  $-47^{\circ}\text{C}$  และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ  $-22^{\circ}\text{C}$



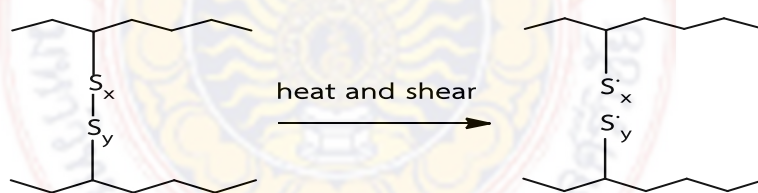
ภาพที่ 1.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $T_g$  กับจำนวนโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Gelling and poster, 1988)

3. ความทนทานต่อน้ำมัน สภาพความเป็นขี้ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ความต้านทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายเปลี่ยนแปลงไป ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีระดับการเกิดอีพอกไซด์สูงจะเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารไฮโดรคาร์บอน แต่ความทนทานต่อตัวทำละลายที่มีขี้ลดลง ยาง ENR-50 จะทนทานต่อ ASTM oil ได้ใกล้เคียงกับยางไนไตรล์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ปานกลางและจะทนกว่ายางคลอโรพรีนจึงสามารถใช้ ENR-50 แทนพอลิเมอร์เหล่านี้ได้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความทนต่อน้ำมัน

4. การเหนียวติดกันและความทนต่อโอโซนและการซึมของอากาศ เมื่อระดับของการเกิดปฏิกิริยาอีพอกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการเหนียวติดกันของยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขี้ลดลง แต่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะสามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ที่มีขี้ได้ดีขึ้น ในส่วนของความทนทานต่อโอโซนและการซึมของอากาศดีใกล้เคียงกับยางบิวทิล เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลงและมีกลุ่มของอีพอกไซด์เกิดขึ้นแทน

### 1.2.3 ยางรีเคลม (Reclaim Rubber)

ผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นจะต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางจากอ่อนนิ่มเป็นยางที่มีความแข็งและเหนียว และปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกกร่อน ความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ทำให้ยางเหมาะกับการใช้งาน อย่างไรก็ตามยางภายหลังจากการวัลคาไนซ์แล้วทำให้ยางไม่สามารถไหลและขึ้นรูปใหม่ได้ ฉะนั้นหากต้องการนำผลิตภัณฑ์ยางใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปของยางตั้งต้น จำเป็นจะต้องทำลายพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลของยางเสียก่อน กระบวนการทำลายพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลของยางเรียกว่ากระบวนการดีวัลคาไนซ์ (devulcanization process) กระบวนการดีวัลคาไนซ์แสดงดังรูปที่ 1.11 และยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์แล้วจะเรียกว่า ยางรีเคลม (reclaimed rubber)



ภาพที่ 1.11 การทำลายพันธะกำมะถันด้วยความร้อนและแรงเฉือน  
(<http://www.thairubbersourcing.com>)

ยางรีเคลมสามารถนำไปใช้ผสมยางใหม่เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ ลดเวลาในการผสมยางทำให้ ประหยัดพลังงานมากขึ้นและลดปริมาณการใช้สารเคมี นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เช่น ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูดและคาเลนเดอร์ยางรีเคลมสามารถช่วยลดการบวมพองและการหดตัวระหว่างการเอ็กซ์ทรูดลงทำให้ ผลิตภัณฑ์ที่เอ็กซ์ทรูด มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ หรือการวัลคาไนซ์สามารถทำได้เร็วขึ้น ความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีขึ้น และช่วยลดปริมาณของเสีย

### กระบวนการตีวัลคาไนซียง

กระบวนการการทำยางรีเคลมที่มาจากยางธรรมชาติ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี ใช้เพียงความร้อนเท่านั้น แต่ยางรีเคลมที่ทำมาจากยางสังเคราะห์จะต้องใช้ทั้งความร้อนและสารเคมีชนิดอื่น ๆ เช่น พลาสติไซเซอร์ ซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลยางแยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น, แทคทีไฟเออร์ช่วยในการแปรรูปหลังให้ความร้อนซึ่งทำให้ยางเหนียวและนุ่มขึ้น, และ reclaiming agent ช่วยในกระบวนการรีเคลมเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนของกระบวนการรีเคลม คือ การแยกเอาชิ้นส่วนต่างๆ ที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ออกไปก่อน แล้วนำส่วนของยางที่สามารถรีไซเคิลได้ไปบดให้ละเอียดและนำไปผ่านกระบวนการตีวัลคาไนซ (devulcanization process) กำจัดสิ่งเจือปนออก และรีดเป็นแผ่นในขั้นตอนสุดท้าย โดยกระบวนการตีวัลคาไนซียงสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้ (<http://www.thairubbersourcing.com>)

1. กระบวนการย่อย (digester process) กระบวนการย่อยเป็นการตีวัลคาไนซียงที่อุณหภูมิสูงร่วมกับการกวนเป็นเวลาานาน ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกของพันธะโพลิสัลฟิดิก (polysulfidic) แต่ก็อาจทำให้เกิดการแตกของสายโซ่หลักของยางอีกด้วย ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดของกระบวนการนี้ จึงต้องใช้เครื่องเอกซทрудชนิดเกลียวคู่ที่มีแรงเฉือนสูง ร่วมกับการใช้สารรีเคลมและสภาวะการผลิตที่เหมาะสม

2. กระบวนการดีลิงค (De-Link process) กระบวนการดีลิงคเป็นการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสารรีเคลมใส่ลงในยางมาสเตอร์แบตซ์ ซึ่งจะผสมในเครื่องบดผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) หรือเครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี (Banbury internal mixer) ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยง

3. การใช้คลื่นไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก เป็นเทคโนโลยีการตีวัลคาไนซียง ด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก สามารถใช้ได้กับขยยะยางทั่วไป วิธีนี้แม้ว่าจะผลิตด้วยอุปกรณ์ที่ทันสมัย แต่ก็ยังไม่สามารถให้ผลผลิตทางอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพได้

4. กระบวนการอื่นๆ สำหรับทำยางรีเคลม เช่น เทคนิคการตีวัลคาไนซียงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำโดยใช้เครื่องเอกซทрудแบบเกลียวคู่ และให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเข้าไปในระบบ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างร่างแหของยางเกิดการบวมตัวและเกิดการแตกออกของพันธะการเชื่อมโยง

#### 1.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nelson *et al.* (2002) ศึกษาอิทธิพลของยางผสมระหว่างอะคิไลไนไตร (NNR) กับยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (MA-g-RR) จากการศึกษาพบว่ายาง MA-g-RR ส่งผลต่อสมบัติทำให้ค่าทอร์คต่ำสุด (minimum torque) และความแตกต่างระหว่างค่าทอร์คเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการสกออร์ชและเวลาการวัลคาไนซเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาพบว่ากราฟต์ยางรีเคลมด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์จะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และสมบัติการกระดอนตัว

เบญจ และคณะ (2549) ศึกษาการเตรียมกาวสำหรับติดประสานงานไม้ จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีโมลอีพอกไซด์ 40% (ENR-40) ที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลในรูปน้ำยางโดยวิธีการตัด



สายโซ่โมเลกุลพร้อมปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน โดยทำการศึกษาปริมาณตัวเร่ง(Dabco T-9) ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนและความต้านทานต่อแรงบดของกาวยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมได้จากผลการทดลองพบว่า การใช้คิวมาโรอินเดนเรซิน 30 phr ร่วมกับ Dabco T-9 5 phr สารละลายกาวยางที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานต่อแรงเฉือน ค่าความต้านทานต่อแรงบด และการทนน้ำผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวยาง (มอก.512-2527)

แวอาแซ และคณะ (2558) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของกาวยางธรรมชาติให้มีสมบัติดีขึ้นในด้านการทนไฟ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารประกอบที่มีฟอสฟอรัสเป็นสารหน่วงในกาวทนไฟ โดยได้ศึกษาสมบัติการยึดเกาะและสมบัติการทนไฟของกาวยางธรรมชาติทนไฟ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นได้ว่า กาวยางธรรมชาติทนไฟ สามารถนำมาเตรียมได้โดยใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยที่ปราศจากสารประกอบที่มีฮาโลเจน และสามารถนำไปทำกาวทนไฟสำหรับติดยางทนไฟและเชื่อมต่อพองน้ำทนไฟ

สรารุช และคณะ(2559) ศึกษาผลของยางรีเคลมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง ในยางผสมระหว่างยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน พบว่าการเพิ่มปริมาณธรรมชาติอีพอกไซด์ ส่งผลทำให้การบวมพองในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่องลดลง และพบว่าการเพิ่มปริมาณยางรีเคลมไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของยางผสม ปริมาณยางรีเคลมที่เหมาะสมสำหรับใช้ในยางผสม 70/30 EPDM/ENR ควรอยู่ในช่วง 10-30 phr เพื่อไม่ให้สมบัติเชิงกลของยางผสมด้อยลงมากและยังช่วยลดต้นทุนการผลิตได้

ชินรัตน์ (2555) สนับสนุนให้มีการใช้ยางรีเคลมและยางรีเคลมบิวไทล์ในการผลิตยางล้อยางรีเคลมนอกจากจะมีข้อดีในเรื่องต้นทุนที่ถูกกว่ายางธรรมชาติแล้ว กระบวนการผลิตยางรีเคลมยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการรีไซเคิลขยะและเศษยางอีกด้วย จากการศึกษาพบว่า ยางรีเคลมประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 50 โดยประมาณ ถ้าหากนำยางรีเคลม 20 phr. มาแทนที่ยางธรรมชาติ 10 phr. ที่เหลือเป็นยางธรรมชาติ 90 phr. ก็จะสามารถประหยัดต้นทุนได้ นอกจากข้อดีที่เห็นได้ชัดในเรื่องต้นทุนที่ลดลง การใช้ยางรีเคลมร่วมกับยางใหม่นี้ยังส่งผลดีต่อการผลิตอีกด้วยเช่น เวลาในการผสมลดลงประหยัดพลังงานมากขึ้น ผลึกภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูดและคาเลนเดอร์มีขนาดและรูปทรงสม่ำเสมอ การบวมพองและการหดตัวระหว่างการเอกซ์ทรูดลดลง การยึดติดดีขึ้น วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้นทำให้ผลผลิตสูงขึ้นและต้านทานต่อการบ่มเร่งได้ดี

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อสมบัติของกาวไม้ โดยใช้สัดส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อยางรีเคลมที่ 100/0, 95/5, 90/10, 80/20 และ 60/40

2. ศึกษาอิทธิพลปริมาณของมาลิคิกแอนไฮไดรด์ในการกราฟต์ยางรีเคลมต่อสมบัติของกาวไม้ โดยใช้มาลิคิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 4, 6, 8 และ 10 phr

3. ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของกาวไม้จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิคิกแอนไฮไดรด์ โดยเปรียบเทียบ 3 ระบบคือระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมการที่มีราคาถูกจากการนำเอายางรีไซเคิลมาผสมร่วม อีกทั้งเป็นการช่วยลดปริมาณขยะที่มาจากผลิตภัณฑ์ยางที่ย่อยสลายยาก
2. ช่วยเพิ่มแนวทางในการนำยางธรรมชาติมาใช้ ทำให้ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น
3. ทราบอิทธิพลของสัดส่วนยาง ENR ต่อยางรีไซเคิล อิทธิพลของการกราฟต์ยางรีไซเคิลด้วยมาลิคแอนไฮไดรด์ และอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของกาวยาง



## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 ยางและสารเคมี

1. ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) เกรดทางการค้ามีหมู่อีพอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ENR25) จำหน่ายโดยบริษัทแซน-แทป อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
2. ยางรีเคลม (Reclaim Rubber) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอ็น.ดี.รับเบอร์ จำกัด (มหาชน)
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) เป็นสารตัวกระตุ้นการวัลคาไนซ์ยางในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ผลิตโดยบริษัทยูนิไทย จำกัด
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารตัวกระตุ้นการวัลคาไนซ์ยางในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ผลิตโดยบริษัทอินพีเรียล เคมีคัล จำกัด
5. วิงสเตย์แอล (Wingstay L) เป็นสารป้องกันการเสื่อม (antioxidant) จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วนกิจไพบูรณ์เคมี จำกัด
6. วูดเรซิน (Wood rosin) เป็นสารเทคตีไฟเออร์ (tackifier)
7. มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich
8. ไดเบนโซไทอาซิลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl disulphide, MBTS) เป็นสารตัวเร่งการวัลคาไนซ์ยางในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ผลิตโดย Asia Pacific Specialty Chemicals Limited
9. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) เป็นสารช่วยในกระบวนการผสม
10. โทลูอีน (Toluene) เป็นตัวทำละลายผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich
11. กำมะถัน (Sulphur) เป็นสารวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัทเพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

#### 2.2 อุปกรณ์

1. เครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว สามารถผสมยางได้ในปริมาณ 2.5-4 ปอนด์ ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 15 แรงม้า ผลิตโดยบริษัท ชัยเจริญการช่างประเทศไทย จำกัด
2. เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal Mixer) เครื่องบดผสมระบบปิด มีความจุของห้องเส้น 500 มิลลิลิตร ผลิตโดยบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด
3. เครื่องอัดไฮโดรลิก (Compression Moulding) ใช้อัดเข้าซึ่งมีส่วนประกอบ คือ มีชุดควบคุมความร้อนที่ใช้ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ 3 ชุด อุณหภูมิสูงสุดของเครื่องเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีแรงอัดสูงสุดเท่ากับ  $350 \text{ kg/cm}^2$  ผลิตโดยบริษัทชัยเจริญการช่างประเทศไทย จำกัด

#### 2.3 การทดสอบ

1. สมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง ทดสอบด้วยเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น TECH OD+ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 ที่ความถี่ 1.67 Hz อุณหภูมิ



การทดสอบ 150 องศาเซลเซียส รายงานผลค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) ค่าทอร์คสูงสุด ( $M_H$ ) ความแตกต่างค่าทอร์ค ( $M_H - M_L$ ) เวลาการสกรอร์ช ( $T_{S1}$ ) เวลาการวัลคาไนซ์ ( $T_{C90}$ )

2. ความหนืดของยางทดสอบด้วยเครื่อง Mooney Viscometer ยี่ห้อ Montech รุ่น MV-2020 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1646 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 100 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบโดยอุ่นยาง 1 นาที แล้วทำการทดสอบใช้เวลาการทดสอบ 4 นาที

3. การทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D224 ใช้เครื่องวัดความแข็งกดลงบนชิ้นทดสอบโดยทำการวัด 3 ตำแหน่ง อ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดของเครื่อง แล้วหาค่ากลาง ค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็น Shore A รางที่ใช้ทดสอบ จะต้องมีความหนาประมาณ 8-10 มิลลิเมตร ความกว้างไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร การวัดจะต้องกดให้แป้นสัมผัสกับหน้ายางโดยตลอด

4. การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Shear strength) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Tensile testing machine ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10 KS ผลิตโดยบริษัท Hounsfield รุ่น H10 KS ประเทศอังกฤษ การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 mm/min การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 ขึ้นทดสอบตัดตามมาตรฐาน die type C การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 ขึ้นทดสอบตัดตามมาตรฐาน die type B การรายงานผลจะรายงานค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืดของชิ้นทดสอบ ณ จุดขาด (Elongation at break) ความเค้นหรือโมดูลัสในการยืดของชิ้นทดสอบที่ระยะยืด 100% และ 300% (Modulus at 100% and 300% elongation) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

5. การทดสอบความต้านทานต่อแรงฉีกของกาวทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2339 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Tensile testing machine ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10 KS ผลิตโดยบริษัท Hounsfield รุ่น H10 KS ประเทศอังกฤษ ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 50 mm/min โดยนำยางไปละลายในโทลูอีน ในอัตราส่วนยาง 5 กรัม ต่อโทลูอีน 20 มิลลิลิตร แล้วทาลงบนชิ้นทดสอบพักไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบเป็นอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำมาทดสอบ

6. ทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ DRY-CABINET รุ่น AD-030 มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือเมื่อรังสีอินฟราเรดที่หลายความถี่จากแหล่งกำเนิดคลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปยังอิเทอร์โพโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็น beamsplitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่และกระจกที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อรังสีสะท้อนกลับมาจาก beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน หรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกับช่วงสแกนของกระจกโดยที่อัตราการสุมวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He-Ne laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้จะถูกอยู่ในรูปอินเทอร์โพโรแกรมถูกเก็บไว้

7. วัดความหนืดของกาวด้วยเครื่อง Brookfield รุ่น DV-2T เตรียมตัวอย่างกาวที่จะนำมาทดสอบความเข้มข้นที่ 5% โดยการนำยางมาละลายในทูลูอินในอัตราส่วนยาง 5 กรัม ต่อทูลูอิน 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำกาวที่ได้ไปวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield การวัดนั้นจะใช้เข็มเบอร์ 5 จุ่มเข็มลงในสารตัวอย่างจนถึงรอย Mark ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ จากนั้น Running Viscosity Test โดยเครื่องจะแสดงผลค่า Viscosity โดยอัตโนมัติ

8. การทดสอบความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายทูลูอิน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471 ทำการทดสอบโดยการตัดตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ให้มีขนาด 10 มม. x 10 มม. ทำการชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ แล้วนำยางไปแช่ในตัวทำละลายทูลูอินที่บรรจุใส่ในขวดสีชา แช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างทดสอบออกมาซับทูลูอินให้แห้งด้วยกระดาษทิชชูแล้วชั่งน้ำหนักหลังการแช่ตัวทำละลาย รายงานผลการทดสอบในรูปของเปอร์เซ็นต์การบวมพอง (swelling ratio) การคำนวณดังสมการ

$$\text{Swelling ratio (\%)} = ((M-M_0)/M_0) \times 100$$

โดย  $M_0$  คือ น้ำหนักก่อนแช่ตัวทำละลาย

$M$  คือ น้ำหนักหลังแช่ตัวทำละลายหรือน้ำหนักของยางที่บวมพอง

9. การทดสอบความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (Crosslink Density) ของยางคำนวณได้จากสมการ Flory-Rehner โดยคำนวณจากสูตร

$$X_c = \frac{-[\ln(1-\nu_2) + \nu_2 + \chi\nu_2^2]}{V_1 \left( \nu_2^{1/3} - \frac{\nu_2}{2} \right)}$$

เมื่อ  $X_c$  คือ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ( $\text{mol/cm}^3$ )

$\nu_2$  คือ สัดส่วนของปริมาตรของยางตัวอย่างกับปริมาตรของยางที่บวมพอง

$V_1$  คือ ปริมาตรของตัวทำละลายทูลูอิน 1 โมล

$\chi$  คือ สัมประสิทธิ์ความเข้ากันได้ของยางกับตัวทำละลาย (NR/Toluene = 0.393)

สัดส่วนของปริมาตรของยางตัวอย่างกับปริมาตรของยางที่บวมพอง สามารถคำนวณได้จาก

$$\nu_2 = \frac{m_2 / \rho_2}{(m_2 / \rho_2) + (m_1 / \rho_1)}$$

เมื่อ  $m_1$  คือ น้ำหนักของยางที่บวมพอง

$m_2$  คือ น้ำหนักของตัวทำละลายในยางที่บวมพอง

$\rho_1$  คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย

$\rho_2$  คือ ความหนาแน่นของยางวัลคาไนซ์

## 2.4 วิธีการทดลอง

### 2.4.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อสมบัติของกาวไม้

เตรียมยางคอมปาวด์โดยสูตรการผสมแสดงดังตารางที่ 2.1 ในขั้นตอนการผสมทำการผสมสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้เครื่องผสมแบบปิดผสมยางที่ไม่ใส่สารวัลคาไนซ์โดยสภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm ขั้นตอนที่สองนำยางที่ผสมได้ในขั้นตอนแรกผสมสารวัลคาไนซ์ (Sulphur และ MBTS) ด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง รีดยางเป็นแผ่นวางทิ้งไว้ 1 คืน แล้วนำยางคอมปาวด์ไปทำการทดสอบสมบัติ หลังจากนั้นนำยางไปอัดเข้าอุณหภูมิและเวลาการอัดเข้าตามเวลาที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Oscillating disc rheometer (ODR) แล้วนำยางวัลคาไนซ์ที่ได้ทำการทดสอบสมบัติยางคอมปาวด์ สมบัติยางวัลคาไนซ์และสมบัติกาว

สมบัติยางคอมปาวด์ทดสอบสมบัติความเหนียวนี้ตามมาตรฐาน ASTM D1646 และทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ตามมาตรฐาน ASTM D5289 สมบัติยางวัลคาไนซ์ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 ทดสอบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D224 และทดสอบความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM D471 สมบัติกาวทดสอบสมบัติกาวโดยการนำยางคอมปาวด์มาละลายในตัวทำละลาย แล้วทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D2339-94

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้จะเลือกสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ให้สมบัติที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปศึกษาในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2.1 สูตรยางคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่สัดส่วนต่างๆ

Ingredients	Content (phr.)
ENR/Reclaim	100/0, 95/5, 90/10, 80/20, 60/40
Zinc Oxide	5
Stearic acid	2
Wing stay L	0.5
Wood rosin	20
ZDEC	0.7
ZMBT	0.3
Sulphur	3

#### 2.4.2 การศึกษาอิทธิพลปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรต์ในการกราฟต์ยางรีเคลมต่อสมบัติ กาวไม้

เตรียมยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรต์ โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรต์ที่ปริมาณ 4, 6, 8 และ 10 phr ทำการเตรียมในสภาวะการหลอมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm จากนั้นนำยางที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณหมู่มาลิกแอนไฮไดรต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์ นำยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรต์ไปเตรียมยางคอมปาวด์ การเตรียมและการทดสอบสมบัติเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.4.1

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรต์ในการกราฟต์ยางรีเคลมที่ให้สมบัติเหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกนำไปศึกษาในหัวข้อถัดไป

#### 2.4.3 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรต์

เตรียมยางคอมปาวด์โดยใช้สูตรผสมดังตารางที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ และการทดสอบเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 1 โดยสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะใช้ตามสัดส่วนที่ให้สมบัติเหมาะสมที่สุดจากหัวข้อ 2.4.1

ตารางที่ 2.2 สูตรยางคอมปาวด์ที่มีการแปรระบบการวัลคาไนซ์

Ingredients	Vulcanize System		
	CV	Semi-EV	EV
ENR/Ma-g-RR	100	100	100
Zinc Oxide	5	5	5
Stearic acid	2	1.5	0.8
Wood rosin	20	20	20
ZDEC	0.7	1	2
ZMBT	0.3	0.8	1
Sulphur	3	1.5	0.8

X คือสัดส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อยางรีเคลมที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดในหัวข้อที่ 2.4.1



### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 3.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางรีเคลมผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

##### 3.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

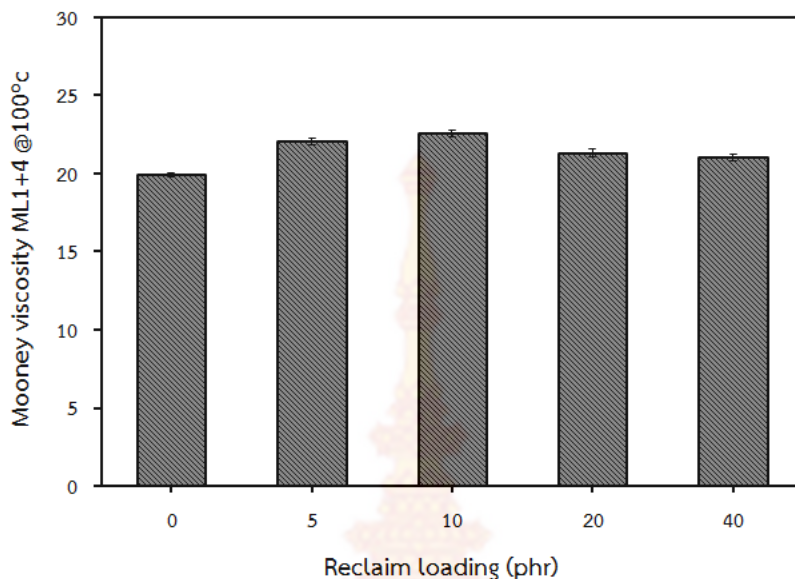
จากการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr ค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) ค่าทอร์คสูงสุด ( $M_H$ ) ผลต่างค่าทอร์ค ( $M_H - M_L$ ) เวลาในการสกอซ ( $T_{s1}$ ) และเวลาการวัลคาไนซ์ ( $T_{c90}$ ) สรุปดังตารางที่ 3.1 จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณรีเคลมจะส่งผลต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ โดยปริมาณของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลทำให้ค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) และค่าทอร์คสูงสุด ( $M_H$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางรีเคลม นั่นคือยางรีเคลมจะมีส่วนผสมของสารตัวเติมอยู่จำพวกคาร์บอนแบล็คจึงส่งผลทำให้ความหนืดสูงความต้านทานต่อการไหลสูงขึ้นส่งผลต่อค่าทอร์คต่ำสุด อีกทั้งการมีสารตัวเติมทำให้ความแข็งของยางวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นดังส่งผลต่อค่าทอร์คสูงสุดที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าผลต่างค่าทอร์คจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มยางรีเคลม โดยค่าผลต่างค่าทอร์คจะบ่งบอกถึงปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางรีเคลมยังส่งผลต่อเวลาในการสกอซ และเวลาการวัลคาไนซ์ลดลงเมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมยังคงมีสารวัลคาไนซ์หลงเหลืออยู่ จึงส่งผลให้ปริมาณของสารในระบบวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 3.1 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลม โดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

Reclaim loading (phr)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$\Delta M_H - M_L$ (dN.m)	$T_{s1}$ (min)	$T_{c90}$ (min)
0	7.01	21.81	0.148	1.87	3.22
5	7.08	22.77	0.157	1.68	3.06
10	7.34	24.00	0.167	1.42	2.95
20	7.42	26.39	0.190	1.12	2.84
40	7.47	30.08	0.226	0.92	2.66

##### 3.1.2 ความหนืดมูนี

ผลการทดสอบความหนืดแสดงดังภาพที่ 3.1 ค่าความหนืดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากสารตัวเติมในยางรีเคลมที่ไปขัดขวางการไหลของยางทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่าความหนืดของยางที่มีค่าความหนืดมากที่สุดในช่วงที่ใช้ปริมาณยางรีเคลมที่ปริมาณ 10 phr และค่าตกลงมาเล็กน้อยในช่วง 20 และ 40 phr

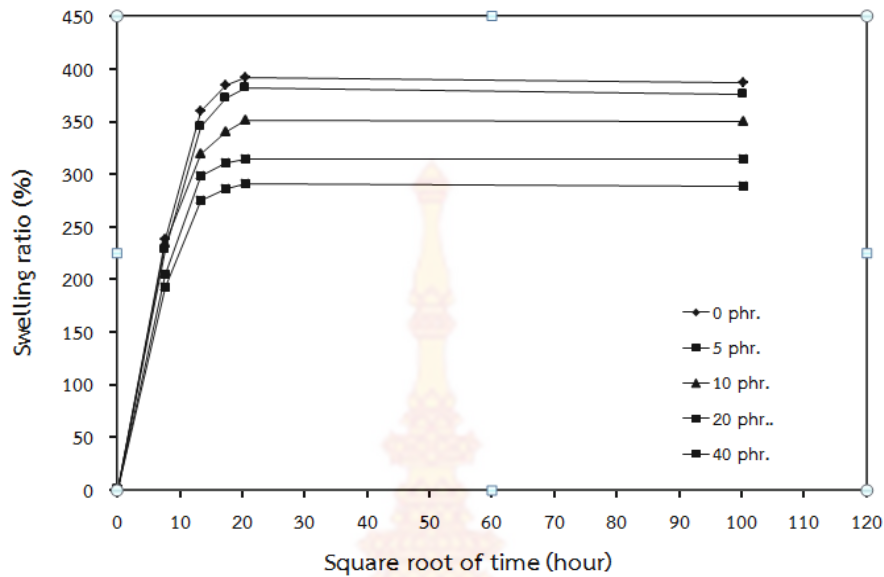


ภาพที่ 3.1 ความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

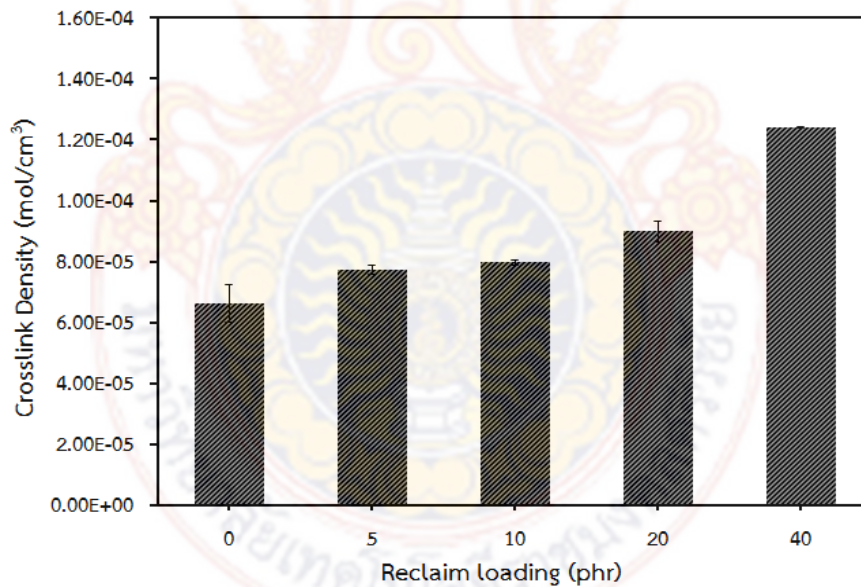
### 3.1.3 สมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

ผลการทดสอบการบวมพองและการทดสอบความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลม ที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr แสดงดังภาพที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ การบวมพองของยางวัลคาไนซ์บ่งบอกถึงความสามารถในการซึมผ่านและแพร่ผ่านได้ของตัวทำละลาย พบว่าผลการทดสอบสมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงจะให้ผลที่สอดคล้องกันคือ การบวมพองจะลดลงเมื่อปริมาณพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณรีเคลมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการบวมพองของยางจะลดลงและมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มตามปริมาณของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้จากยางรีเคลมมีสารในระบบวัลคาไนซ์ที่หลงเหลืออยู่ ทำให้เป็นการเพิ่มปริมาณสารวัลคาไนซ์ในสูตรยางเมื่อเพิ่มยางรีเคลม และส่งผลให้ปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น





ภาพที่ 3.2 ความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr



ภาพที่ 3.3 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

### 3.1.4 สมบัติเชิงกล

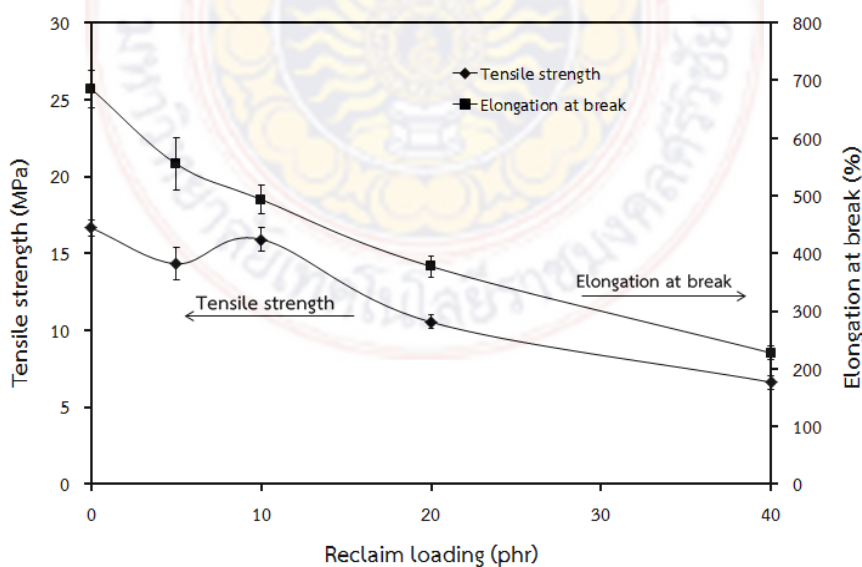
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ระยะยืดจนขาด (elongation at break) มอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ

300% (modulus at 100, 300%) ค่าความแข็ง (hardness) และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางวัลคาไนซ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด ของยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ผสมด้วยยางรีเคลม ที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr แสดงดังภาพที่ 3.4 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง และค่าระยะยืดจนขาดของยางลดลงเมื่อปริมาณของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น อธิบายได้จากปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความหนาแน่นของปริมาณพันธะการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไปขัดขวางการยืดของยางทำให้ระยะยืดจนขาดของยางลดลง ส่วนผลของความต้านทานต่อแรงดึงลดลงนั้นเกิดจากยางรีเคลมเป็นยางเก่าที่ใช้งานแล้วและมีการบดย่อยโมเลกุลของยาง ส่งผลให้ยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงจึงส่งผลต่อยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมยางรีเคลมในปริมาณที่มากขึ้นสมบัติการทนต่อแรงดึงจะลดลง

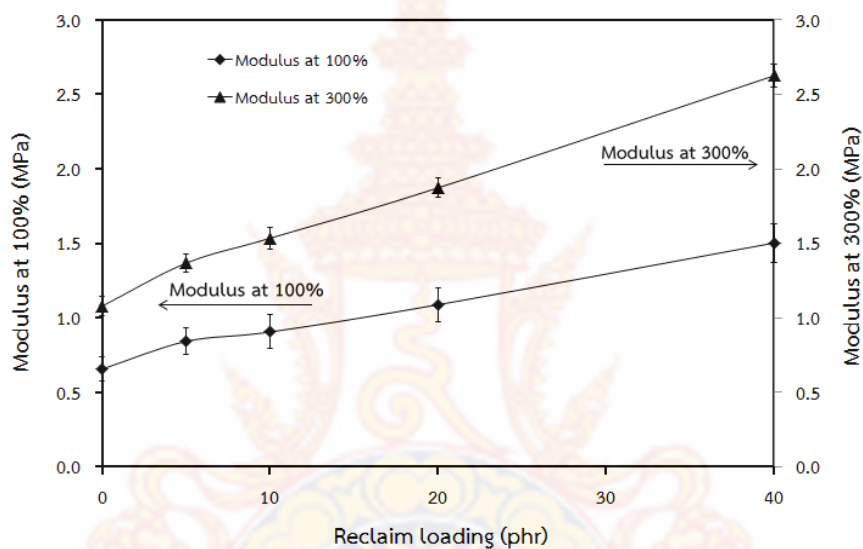
**ตารางที่ 3.2** สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

Reclaim loading (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus at 100% (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)
0	16.66(±0.52)	685.15(±32.19)	0.66(±0.80)	1.08(±0.07)	38.10(±2.97)	26.65(±2.30)
5	14.33(±1.06)	555.25(±46.28)	0.84(±0.09)	1.37(±0.06)	43.36(±1.76)	27.32(±1.56)
10	15.92(±0.80)	493.50(±24.75)	0.91(±0.11)	1.53(±0.08)	43.56(±1.15)	31.44(±1.02)
20	10.54(±0.44)	377.50(±18.70)	1.09(±0.11)	1.87(±0.07)	47.72(±1.40)	29.11(±1.21)
40	6.63(±0.44)	277.50(±12.50)	1.50(±0.13)	2.63(±0.07)	54.55(±1.28)	25.56(±2.06)

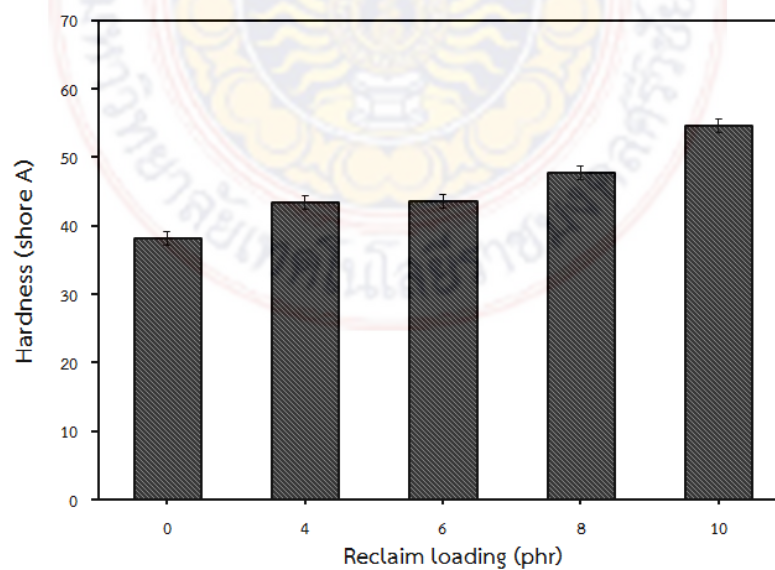


**ภาพที่ 3.4** ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดจนขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

ภาพที่ 3.5 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% และภาพที่ 3.6 แสดงผล ความแข็งของยางธรรมชาติพอกไซดที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr พบว่าค่ามอดูลัสและความแข็งจะให้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือความแข็งและมอดูลัส จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของรีเคลมเพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะการใช้ปริมาณรีเคลมที่เพิ่มขึ้นเสมือนเป็นการ เพิ่มอนุภาคของแข็งเข้าไป และในยางรีเคลมนั้นยังคงมีส่วนผสมของสารตัวเติมจึงส่งผลต่อความแข็ง ของยางเมื่อนำมาผสม อีกทั้งอาจเนื่องจากผลของยางรีเคลมที่ส่งผลทำให้ปริมาณความหนาแน่นของ พันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณยางรีเคลม

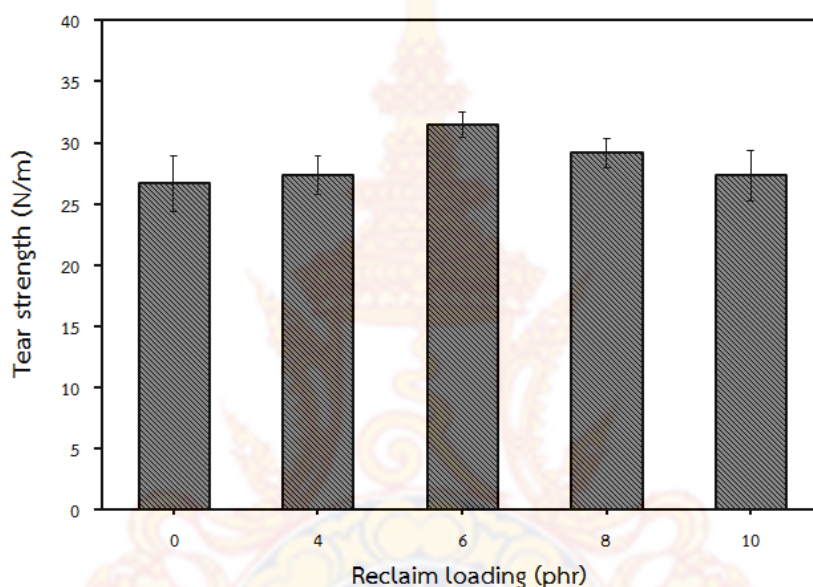


ภาพที่ 3.5 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางธรรมชาติพอกไซดที่ผสมด้วยยางรีเคลม โดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr



ภาพที่ 3.6 ความแข็งของยางธรรมชาติพอกไซดที่ผสมด้วยยางรีเคลมโดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

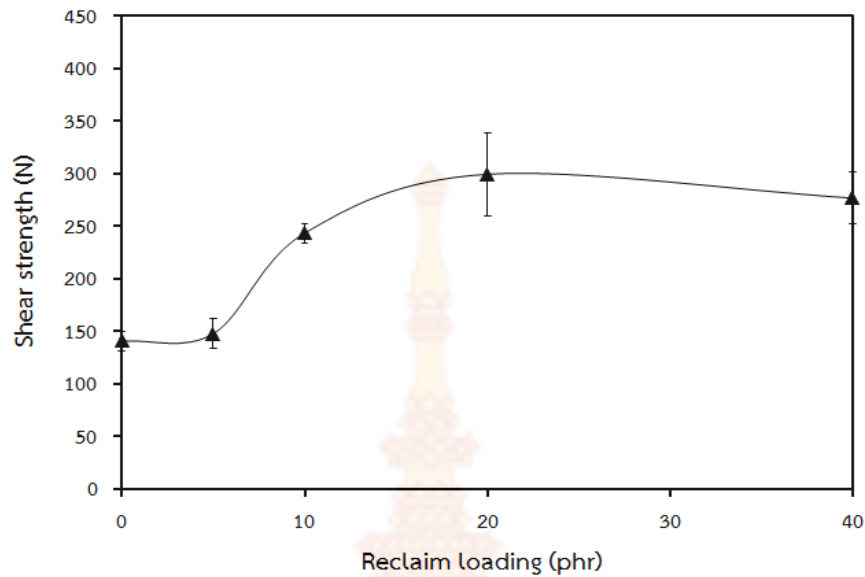
ภาพที่ 3.7 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ยางรีเคลมที่ไม่เกิน 10 phr หลังจากนั้นความต้านทานต่อแรงฉีกขาดจะลดลง การปรับปรุงสมบัติที่ปริมาณยางรีเคลมไม่สูงนั้นเกิดจากการที่ยางมีปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่มากขึ้น แต่เมื่อใส่ในปริมาณที่สูงขึ้นสมบัติจะลดลงนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้นอาจจะทำให้ยางเกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้นเกิดการแข็งตึงเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีค่าลดลง



ภาพที่ 3.7 ความต้านทานต่อการฉีกขาด ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลม โดยแปรปริมาณรีเคลมที่ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

### 3.1.5 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว

การทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว (shear strength) ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมด้วยยางรีเคลม ที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr ดังภาพที่ 3.8 จากการทดสอบพบว่า การใส่ยางรีเคลมเข้าไปจะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของกาวยางเองเพิ่มขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ทำให้เนื้อกาวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ยางรีเคลม และอาจจะเกิดจากการที่โมเลกุลยางรีเคลมที่น้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำจากการผ่านกระบวนการขั้นตอนการใช้งานแล้วและผ่านการทำให้เกิดการขาดของพันธะเชื่อมโยง ทำให้ยางรีเคลมสามารถแทรกซึมเข้าในร่องเนื้อไม้ทำให้การยึดเกาะของกาวและไม้ดีขึ้น



ภาพที่ 3.8 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวยางธรรมชาติพอกไซต์ที่ผสมด้วยยางรีเคลมที่แปรปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr

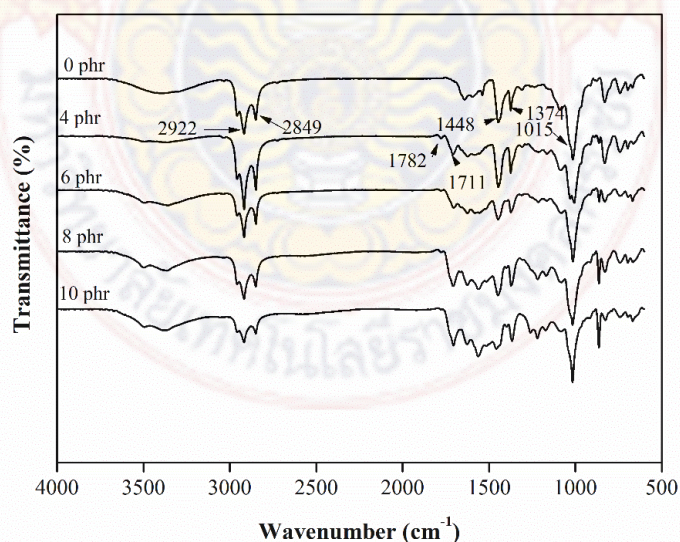
จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว ในปริมาณการใช้ยางรีเคลมที่ 20 phr พบว่าให้สมบัติในการยึดติดของกาวได้ดีที่สุด อีกทั้งเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ พบว่าที่ปริมาณการใส่ยางรีเคลมที่ 20 phr เหมาะสมในการทำกาว ดังนั้นในการศึกษาในหัวข้อถัดไปจึงเลือกใช้ปริมาณยางรีเคลมที่ 20 phr



## 3.2 ศึกษาอิทธิพลปริมาณของมาลิกแอโนไฮโดรต์ในการกราฟต์ยางรีเคลมต่อสมบัติของกาวไม้

### 3.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

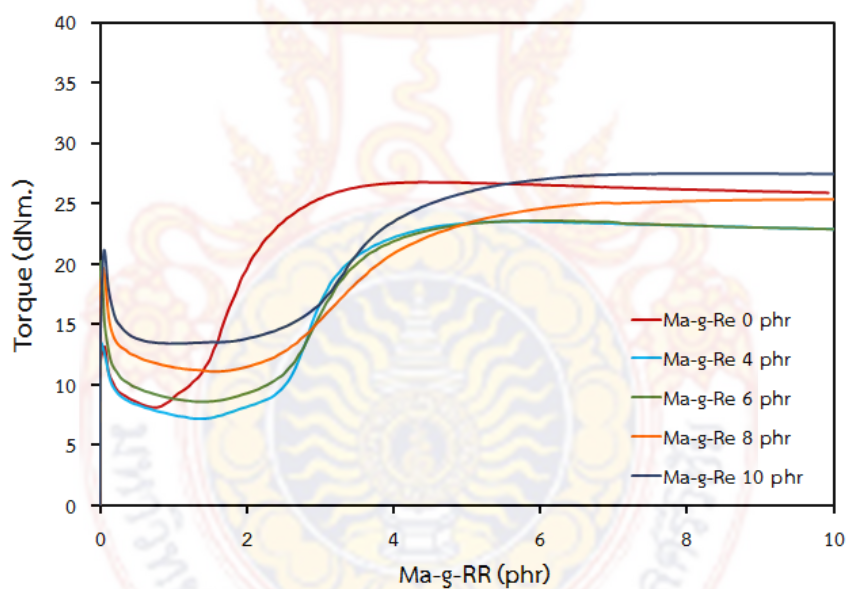
โครงสร้างของยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอโนไฮโดรต์ (Ma-g-RR) โดยแปรปริมาณมาลิกแอโนไฮโดรต์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr ทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดย Ma-g-RR จะทำการกำจัดมาลิกแอโนไฮโดรต์ที่ไม่เกาะติดบนโมเลกุลยางตามวิธีการของ Kalkornsurapranee *et al.* (2012) โดยการนำ Ma-g-RR แช่ในตัวทำละลายทุโลอินที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการกรองเอาแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนด้วยอะซิโตน ทำการแยกตะกอนที่ได้แล้วล้างหลายๆครั้งด้วยอะซิโตน นำไปอบให้แห้งแล้วนำมาทดสอบ แต่กรณีของ Ma-g-RR ที่ใช้มาลิกแอโนไฮโดรต์ที่ปริมาณสูงๆ ที่มากกว่า 8 phr ตัวอย่าง Ma-g-RR หลังจากแช่ทุโลอินจะไม่ละลายจะบวมตัวเป็นเจล ทำการแยกเจลที่บวมตัวล้างหลายๆครั้งด้วยทุโลอิน อบแล้วทำการทดสอบ ผลการทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR ดังภาพที่ 3.9 จากการทดสอบพบว่าทุกสเปคตรัมจะปรากฏพีกโครงสร้างของยางรีเคลมที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $2922\text{ cm}^{-1}$  และ  $2849\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ตำแหน่งความยาวคลื่น  $1448\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ  $-\text{CH}_2$  ตำแหน่งความยาวคลื่น  $1374\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบงอของพันธะ  $-\text{CH}_2$  และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางรีเคลมที่กราฟต์และไม่ได้กราฟต์มาลิกแอโนไฮโดรต์จะพบพีกที่ปรากฏเพิ่มเติมในโครงสร้างของ Ma-g-RR ที่บ่งบอกโครงสร้างของมาลิกแอโนไฮโดรต์ที่เกาะติดบนโครงสร้างยางรีเคลมที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $1782\text{ cm}^{-1}$  และ  $1711\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบยืดของ  $-\text{C}=\text{O}$  ของหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้างของมาลิกแอโนไฮโดรต์ เป็นการยืนยันการเกาะติดของมาลิกแอโนไฮโดรต์ของ Ma-g-RR



ภาพที่ 3.9 สเปคตรัม ATR-FTIR ของยางรีเคลมและยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิกแอโนไฮโดรต์ที่ปริมาณต่างๆ

### 3.2.2 สมบัติการวัลคาไนซ์

จากการศึกษาอิทธิพลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้ปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในการกราฟต์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr ลักษณะของการวัลคาไนซ์แสดงดังรูปที่ 3.10 และสมบัติการวัลคาไนซ์ได้แก่ ค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) ค่าทอร์คสูงสุด ( $M_H$ ) ผลต่างค่าทอร์ค ( $M_H - M_L$ ) เวลาในการสกอซ ( $T_{S1}$ ) และเวลาการวัลคาไนซ์ ( $T_{C90}$ ) สรุปดังตารางที่ 3.3 จากผลการทดสอบพบว่า ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์โดยปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลทำให้ค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) และค่าทอร์คสูงสุด ( $M_H$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ นั่นคือปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ยางมีความเป็นขั้วมากยิ่งขึ้นทำให้เกิดอันตรกิริยาได้ดีขึ้นกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและความแข็งของยางเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าผลต่างค่าทอร์คมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาในการสกอซและเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นกรดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งไปรบกวนการวัลคาไนซ์โดยทำให้เกิดการหน่วงการเกิดการวัลคาไนซ์จึงส่งผลทำให้เวลาวัลคาไนซ์ของยางเพิ่มขึ้น



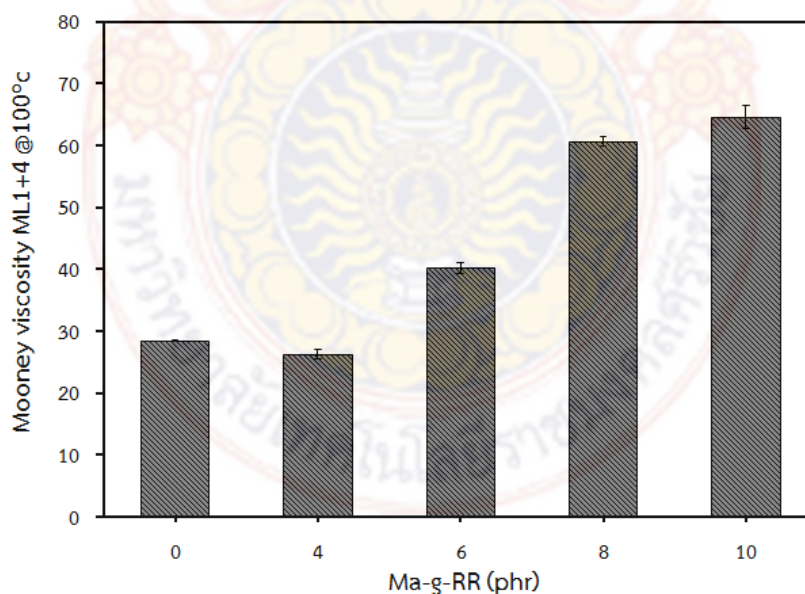
ภาพที่ 3.10 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

ตารางที่ 3.3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

Ma-g-RR (phr)	M <sub>L</sub> (dN.m)	M <sub>H</sub> (dN.m)	ΔM <sub>H</sub> - M <sub>L</sub> (dN.m)	T <sub>s1</sub> (min)	T <sub>c90</sub> (min)
0 phr	8.13	26.78	0.187	1.03	2.82
4 phr	7.19	23.53	0.163	2.01	3.90
6 phr	8.59	23.59	0.150	2.15	4.11
8 phr	11.09	25.39	0.143	2.09	4.92
10 phr	13.41	27.49	0.141	2.34	5.04

### 3.2.3 ค่าความหนืดมูนนี่

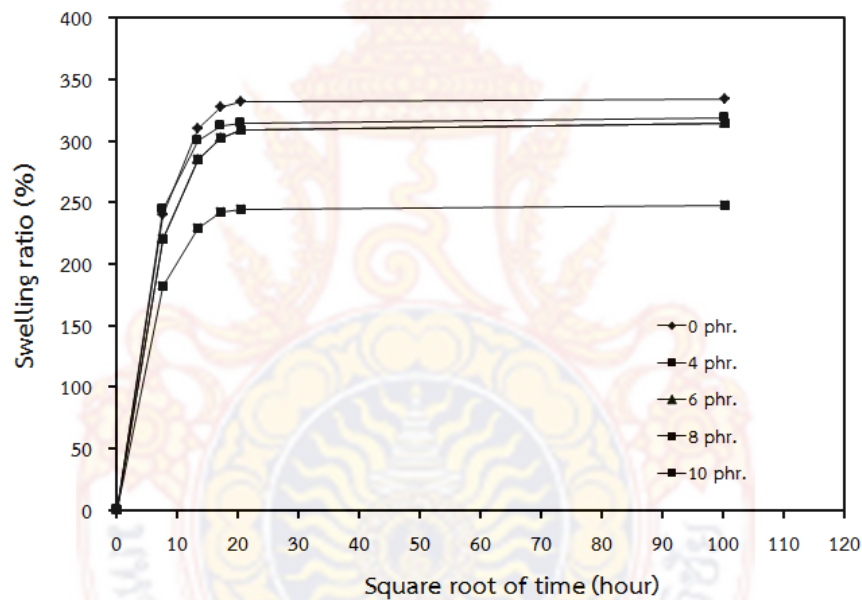
ผลการทดสอบความหนืดแสดงดังภาพที่ 3.11 ค่าความหนืดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ทำให้ยางรีคลอมมีความเป็นขี้ผึ้งเพิ่มมากขึ้นและเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้เกิดอันตรกิริยากันได้ดี ทำให้ไปขัดขวางการเคลื่อนของโมเลกุลยางทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่าความหนืดของยางจะยิ่งสูงขึ้นตามปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 3.11 ความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

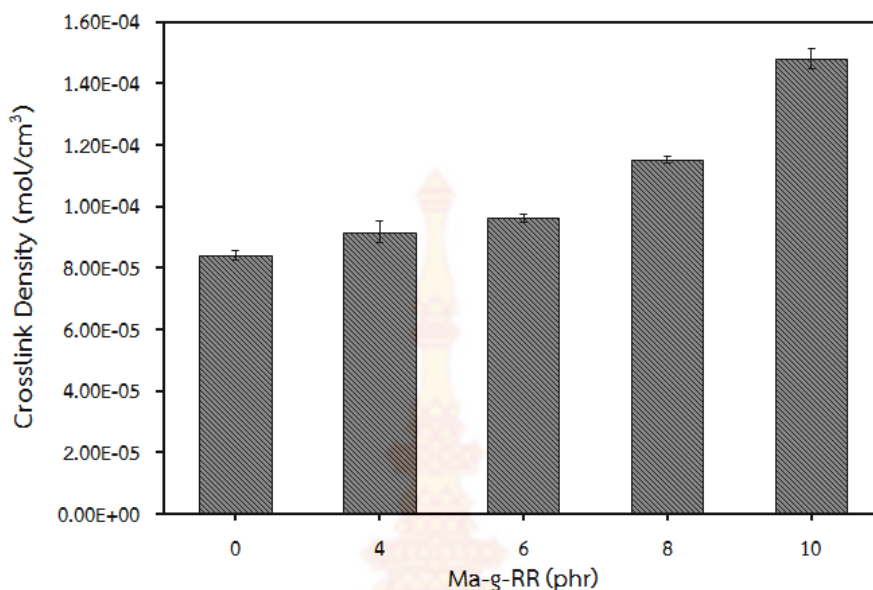
### 3.2.4 สมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

ผลการทดสอบการบวมพองและการทดสอบความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงของ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr แสดงดังภาพที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ พบว่าผลการทดสอบสมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงจะให้ผลที่สอดคล้องกันคือ การบวมพองจะลดลงเมื่อปริมาณพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการบวมพองของยางจะลดลงและมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มตามปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้น ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งมากยิ่งขึ้น ทำให้โครงสร้างของพันธะเชื่อมโยงหนาแน่นมากและแข็งแรง การเพิ่มความชื้นและความหนาแน่นการเชื่อมโยงที่มากขึ้นทำให้ยางทนทานต่อตัวทำละลายได้ดีขึ้น ทำให้การซึมผ่านและแพร่ผ่านของตัวทำละลายยากขึ้น ทำให้สมบัติการบวมพองลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 3.12 ความทนทานต่อบวมพองของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr





ภาพที่ 3.13 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

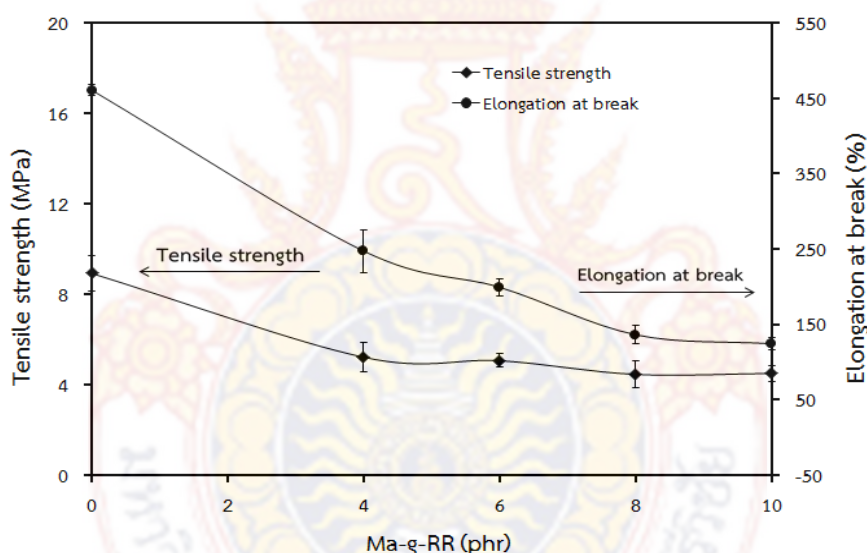
### 3.2.5 สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ระยะยืดจนขาด (elongation at break) โมดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300% (modulus at 100, 300%) ค่าความแข็ง (hardness) และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางวัลคาไนซ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.4 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr แสดงดังภาพที่ 3.14 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าระยะยืดจนขาดของยางมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้น อธิบายได้จากปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความหนาแน่นของปริมาณพันธะการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของยางยึดหยุ่นได้น้อยลง จึงไปขัดขวางการยืดของยางทำให้ระยะยืดจนขาดของยางลดลง ส่วนผลของความต้านทานต่อแรงดึงลดลงนั้นอาจจะเกิดจากการที่ยางยืดได้น้อยจึงส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงสุดลดต่ำลง



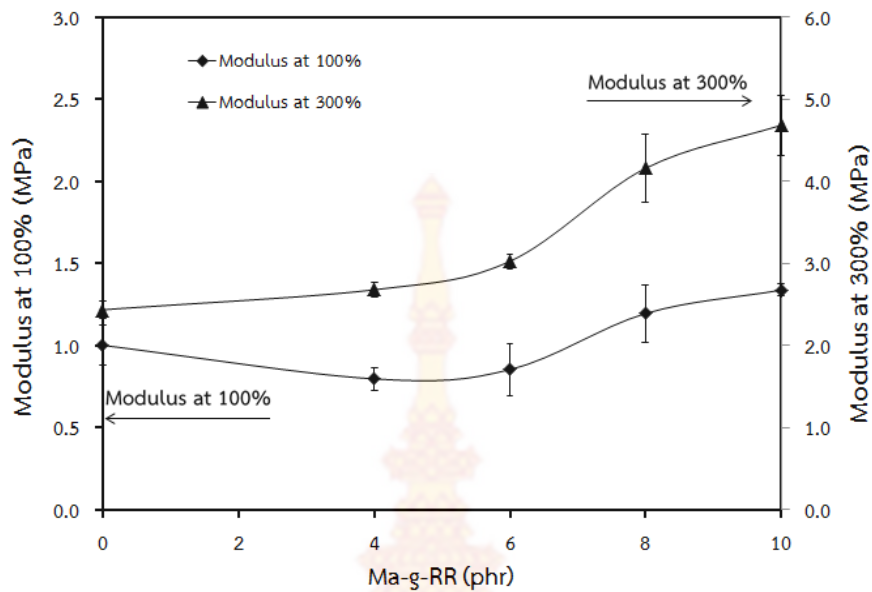
ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

Ma-g-RR (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus at 100% (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)
0 phr	8.92±0.77	460.80±6.75	1.00±0.12	2.44±0.10	46.72±2.36	29.69±1.28
4 phr	5.12±0.63	247.24±28.19	0.80±0.07	2.68±0.09	44.80±0.73	29.41±1.65
6 phr	5.06±0.30	199.20±11.20	0.85±0.16	3.03±0.09	49.90±0.66	26.98±1.91
8 phr	4.45±0.60	136.21±11.91	1.20±0.17	4.16±0.41	51.32±1.48	18.91±1.00
10 phr	4.50±0.36	124.20±7.47	1.34±0.04	4.69±0.37	55.30±1.06	21.35±1.69

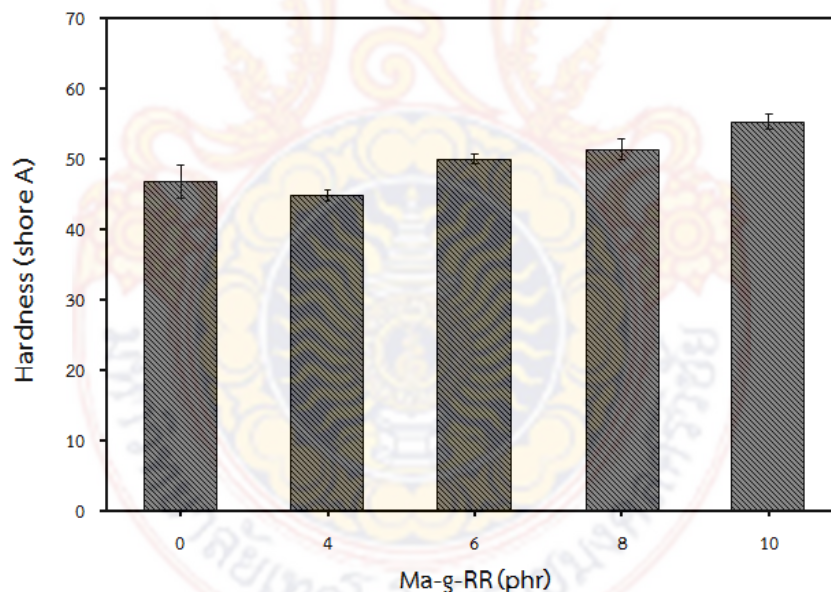


ภาพที่ 3.14 ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดจนขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

ภาพที่ 3.15 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% และภาพที่ 3.16 แสดงผลความแข็งของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr พบว่าค่ามอดูลัสและความแข็งของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ เป็นเพราะปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเป็นขั้วยางรีเคลมที่มากขึ้น ทำให้เข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์มากขึ้นอีกทั้งให้ปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางรีเคลม



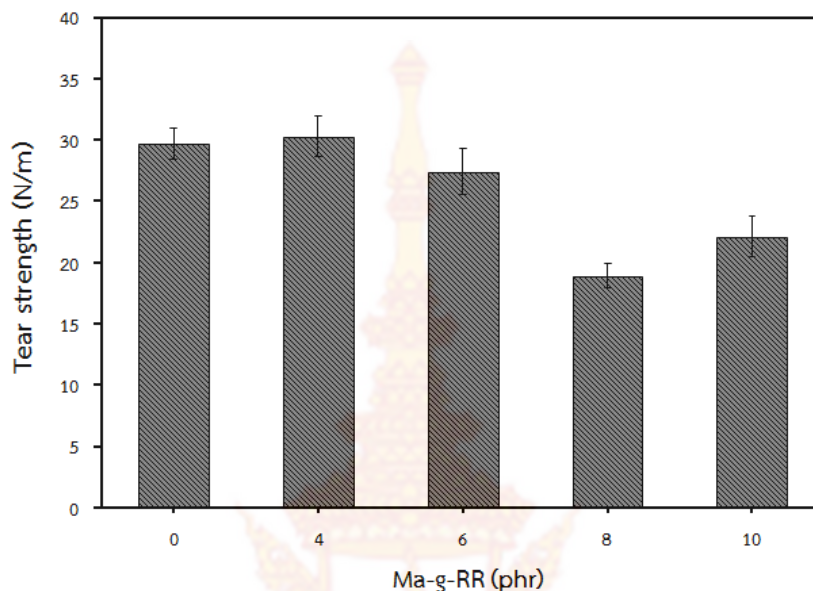
ภาพที่ 3.15 โมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr



ภาพที่ 3.16 ความแข็งของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

ภาพที่ 3.17 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4 และ 6 phr หลังจากนั้นความต้านทานต่อแรงฉีกขาดจะลดลง เกิดจากการที่ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นนั้นความ

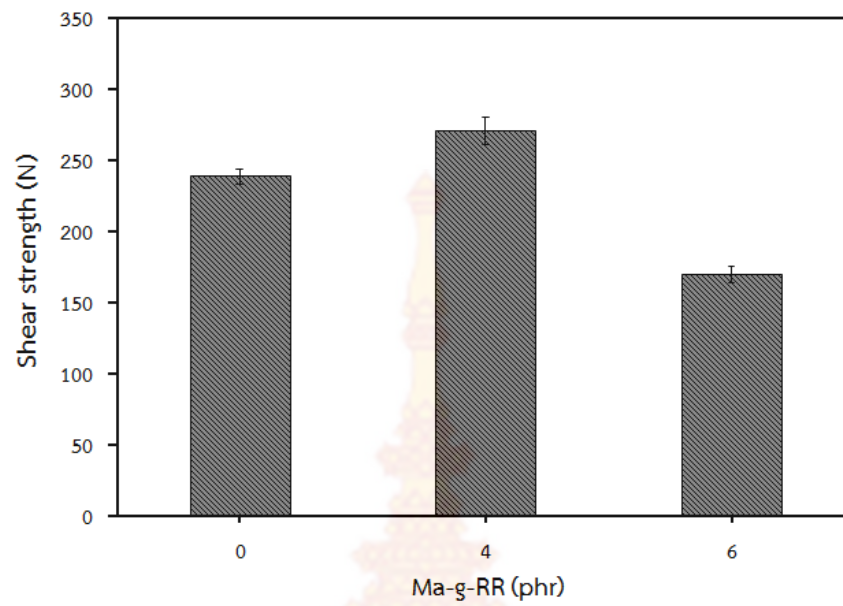
หนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงก็จะมากขึ้นแต่เมื่อใส่ในปริมาณที่สูงส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 3.17 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

### 3.2.6 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว

การทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว (shear strength) ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr ดังภาพที่ 3.18 จากการทดสอบพบว่าปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ 8 และ 10 phr ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้เมื่อนำมาเตรียมเป็นกาวเป็นเพราะความเป็นขี้ของยางที่มากขึ้นจากการกราฟต์ทำให้ทนทานต่อตัวทำละลายที่อื่นมากขึ้น ส่งผลให้ยางกราฟต์ที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณสูงๆ ไม่เกิดการละลาย และในปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ 6 phr การละลายก็เริ่มยากต้องทำการวางทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงจึงจะสามารถละลายในตัวทำละลายได้และมีบางส่วนเล็กน้อยที่ไม่เกิดการละลาย จากผลการทดสอบพบว่ายางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ 4 phr จะช่วยเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่กราฟต์ เนื่องจากการกราฟต์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ทำให้ยางรีเคลมมีความเป็นขี้มากยิ่งขึ้นทำให้มีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีความเป็นขี้ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างยางด้วยกัน อีกทั้งการเพิ่มความขี้ทำให้เพิ่มความเข้ากันได้กับไม้ที่มีความเป็นขี้ จึงส่งผลให้แรงยึดติดดีขึ้น แต่พบว่าที่ปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้นที่ 6 phr ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนลดลง อาจเป็นเพราะประสิทธิภาพของการละลายยางที่ไม่ได้ ส่งผลให้สมบัติลดลง



ภาพที่ 3.18 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสมผสมMa-g-RR โดยใช้มาลิิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr

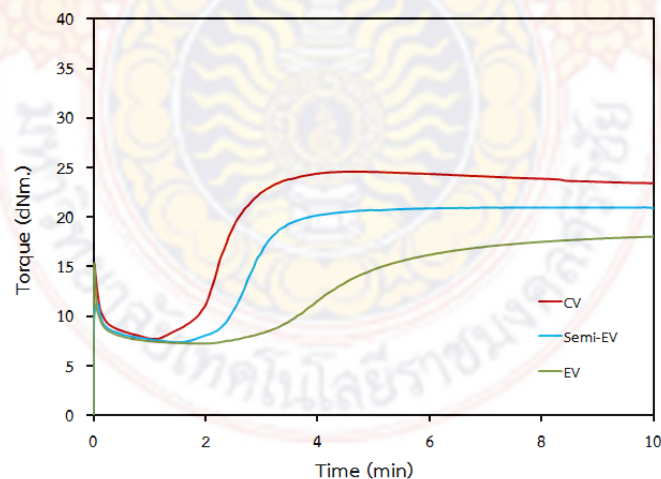




### 3.3 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสมยางรีเคลมที่กราฟต์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์

#### 3.3.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

จากการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR โดยเปรียบเทียบ 3 ระบบคือระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) ลักษณะของการวัลคาไนซ์แสดงดังรูปที่ 3.19 และสมบัติการวัลคาไนซ์สรุปดังตารางที่ 3.5 พบว่าปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งมีผลต่อการเชื่อมโยงของยาง ถึงแม้จะใช้สารตัวเร่งและกำมะถันชนิดเดียวกัน อัตราส่วนปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งพบว่าระบบ CV>Semi-EV>EV ผลการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์พบว่าระบบการวัลคาไนซ์จะไม่ส่งผลต่อค่า ค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) แต่ที่เห็นได้ชัดพบว่าจะส่งผลต่อค่าเวลาการสกอรัชและเวลาการวัลคาไนซ์ โดยพบว่าระบบ CV จะให้เวลาเวลาการสกอรัชและเวลาการวัลคาไนซ์น้อยที่สุด รองลงมาคือระบบ semi-EV และ EV ตามลำดับ ระบบที่มีอัตราส่วนปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งมากที่สุด (CV) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เร็ว เนื่องจากปริมาณของกำมะถันจะมีผลหรือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์มากกว่าปริมาณของสารตัวเร่ง (Sadequl *et al.*, (1998); Rabiei and Shojaei (2016)) นั่นคือระบบไหนที่มีปริมาณกำมะถันสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เร็ว ทำให้ระบบ CV ค่าเวลาการสกอรัชและเวลาการวัลคาไนซ์ต่ำที่สุด และยังส่งผลต่อปริมาณความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยง โดยดูได้จากค่าความแตกต่างค่าทอร์คพบว่าระบบ CV จะให้ค่าสูงที่สุดรองลงมาคือระบบ semi-EV และ EV ตามลำดับ เนื่องจากตัวที่เชื่อมโยงในสายโซ่โมเลกุลยางคือโมเลกุลของกำมะถัน ดังนั้นเมื่อสัดส่วนปริมาณกำมะถันที่สูงจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่ได้ในปริมาณที่สูงด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 3.19 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

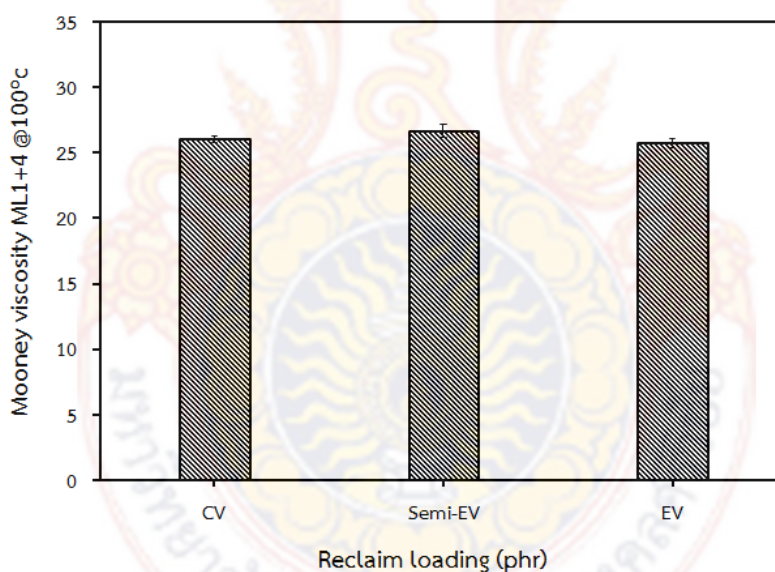


ตารางที่ 3.5 สมบัติลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

Vulcanize System	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$\Delta M_H - M_L$ (dN.m)	$T_{s1}$ (min)	$T_{c90}$ (min)
CV	7.70	24.60	0.169	1.63	3.36
Semi-EV	7.37	20.98	0.136	2.52	4.10
EV	7.24	18.38	0.111	2.98	7.48

### 3.3.2 ค่าความหนืดมูนนี่

ค่าความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) ผลการทดสอบความหนืดแสดงดังภาพที่ 3.20 พบว่าความหนืดจะไม่แตกต่างกันในยางคอมปาวด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบที่ต่างกัน นั่นคือระบบการวัลคาไนซ์ไม่ส่งผลต่อความหนืดของยางคอมปาวด์

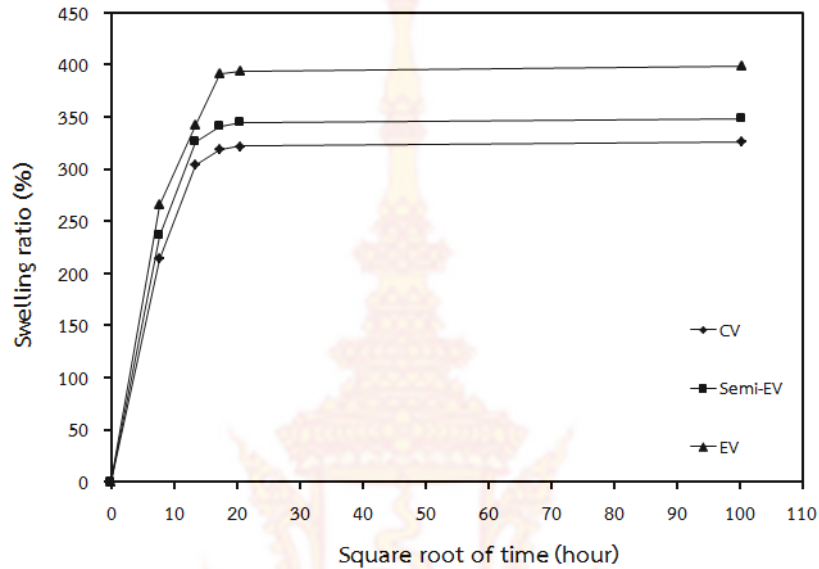


ภาพที่ 3.20 ความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

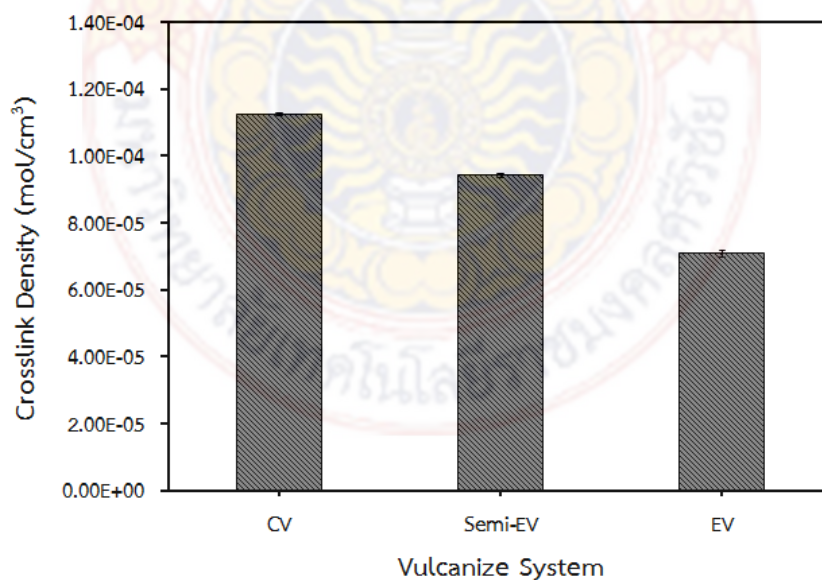
### 3.3.3 สมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

ผลการทดสอบการบวมพองและการทดสอบความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) แสดงดังภาพที่ 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ ผลการทดสอบสมบัติการบวมพองและความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยง พบยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติซึ่งมีปริมาณของกำมะถันอยู่มากทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูง เป็นผลให้

ยางเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้มากขึ้นและเป็นการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบพอลิซัลฟิดิก จึงทำให้ยางมีผลต่อความทนต่อการบวมพองและความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยาง ดีกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพและประสิทธิภาพ ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้กับโมเลกุลของยางเป็นไปได้อย่าง



ภาพที่ 3.21 ความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)



ภาพที่ 3.22 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

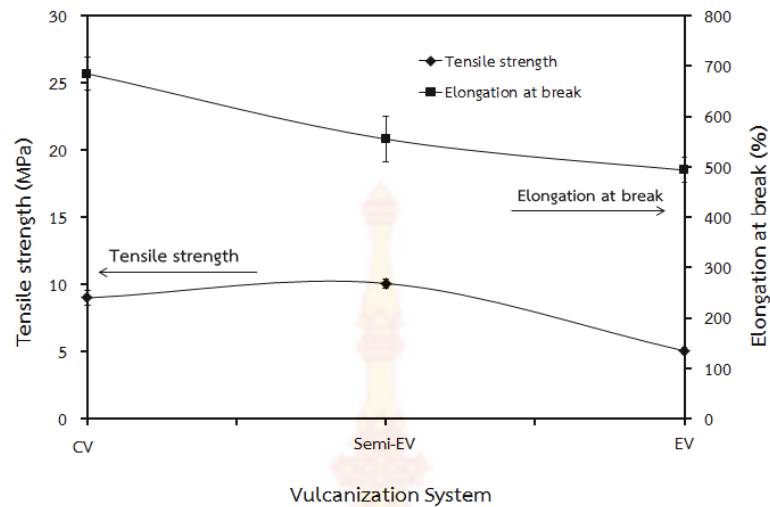
### 3.3.4 สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ระยะยืดจนขาด (elongation at break) โมดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300% (modulus at 100, 300%) ค่าความแข็ง (hardness) และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางวัลคาไนซ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.6

ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) แสดงดังภาพที่ 3.23 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของระบบ CV และ Semi-EV มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าสูงแต่ระบบ EV จะให้ค่าที่ต่ำที่สุด ความแข็งแรงทางกลเกิดจากโครงสร้างที่เป็น polysulphidic นั่นคือระบบการวัลคาไนซ์ที่ให้โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบ polysulphidic จะให้สมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งคือระบบ CV และ Semi-EV และพบว่าความสามารถในการยืดจนขาด ค่าโมดูลัสและค่าความแข็งจะเป็นผลมาจากปริมาณความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยง โดยพบว่าความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยงที่มากจะทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดลดลง ค่าโมดูลัสและค่าความแข็งจะลดลง โดยพบว่าระบบ CV จะมีปริมาณความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงมากที่สุด รองลงมาคือระบบ Semi-EV และ EV

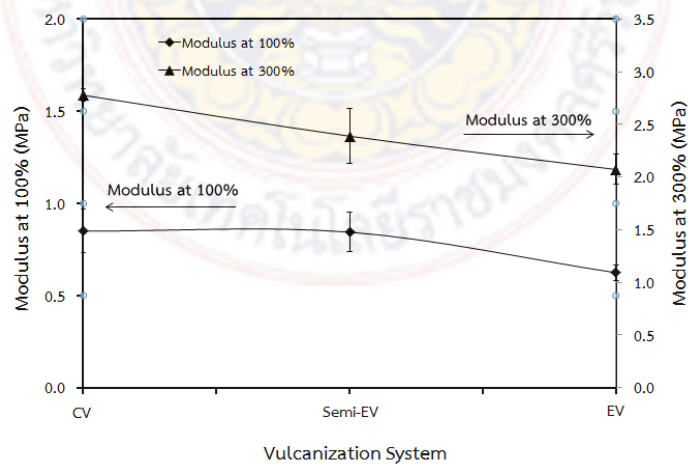
**ตารางที่ 3.6** สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

Vulcanize System	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus at 100% (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)
CV	9.00±0.52	685.15±32.19	0.85±0.12	2.78±0.06	45.18±2.56	29.30±1.53
Semi-EV	10.07±0.33	555.25±46.28	0.84±0.11	2.39±0.26	43.60±0.82	29.75±0.73
EV	5.05±0.22	493.50±24.75	0.62±0.04	2.07±0.14	39.68±1.69	21.75±1.69



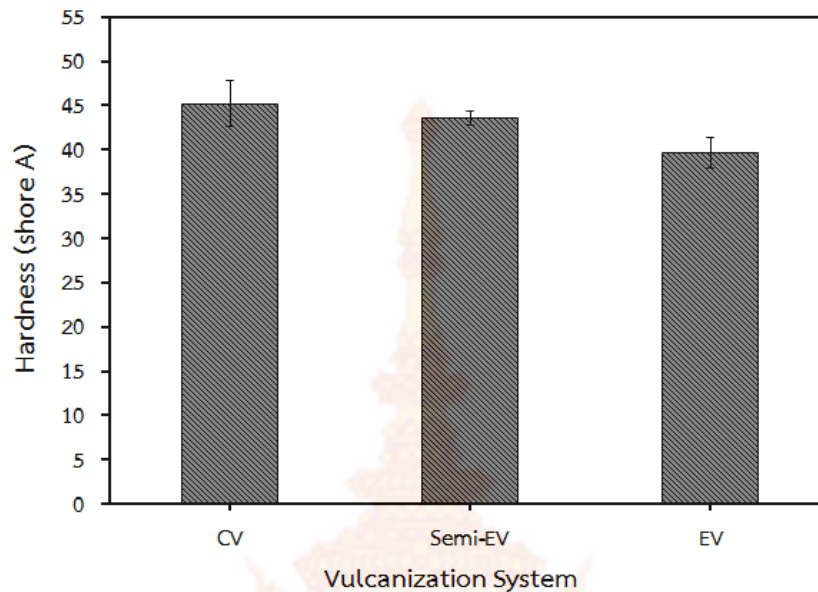
ภาพที่ 3.23 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสมMa-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

ภาพที่ 3.24 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% และภาพที่ 3.25 แสดงผลความแข็งของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) จากการทดลองพบว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ กึ่งประสิทธิภาพ และประสิทธิภาพ ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปริมาณของสารวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลต่อพันธะเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง เป็นผลให้โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวและยืดออกเป็นไปได้อย่างง่ายและยังทำให้ยางมีความแข็งตึงเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อค่ามอดูลัสของยาง และในส่วนของความแข็งของยางนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิกทำให้โมเลกุลยางมีความแข็งแรงมากกว่าซึ่งจะให้สมบัติในการต้านทานต่อแรงที่มากระทำได้ดีกว่า



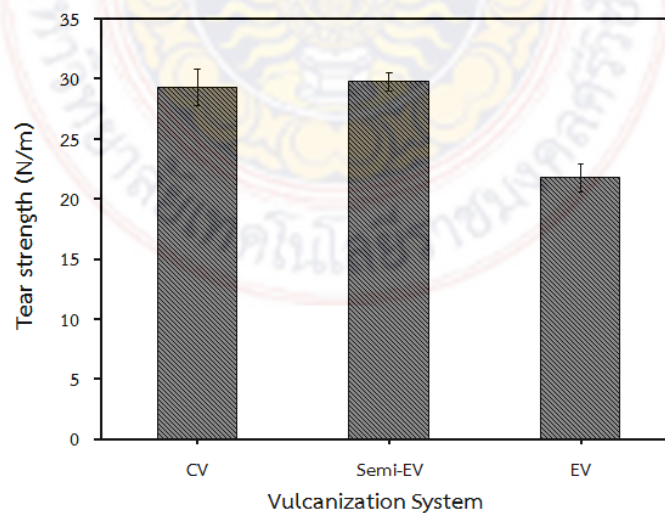
ภาพที่ 3.24 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสมMa-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)





ภาพที่ 3.25 ความแข็งของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

ภาพที่ 3.26 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดนั้นในระบบปกติกึ่งและประสิทธิภาพให้ผลที่ไม่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยการวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและกึ่งประสิทธิภาพมีปริมาณของสารวัลคาไนซ์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และมีการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบพอลิซัลไฟดิก จึงทำให้มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ดีกว่า ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบประสิทธิภาพ

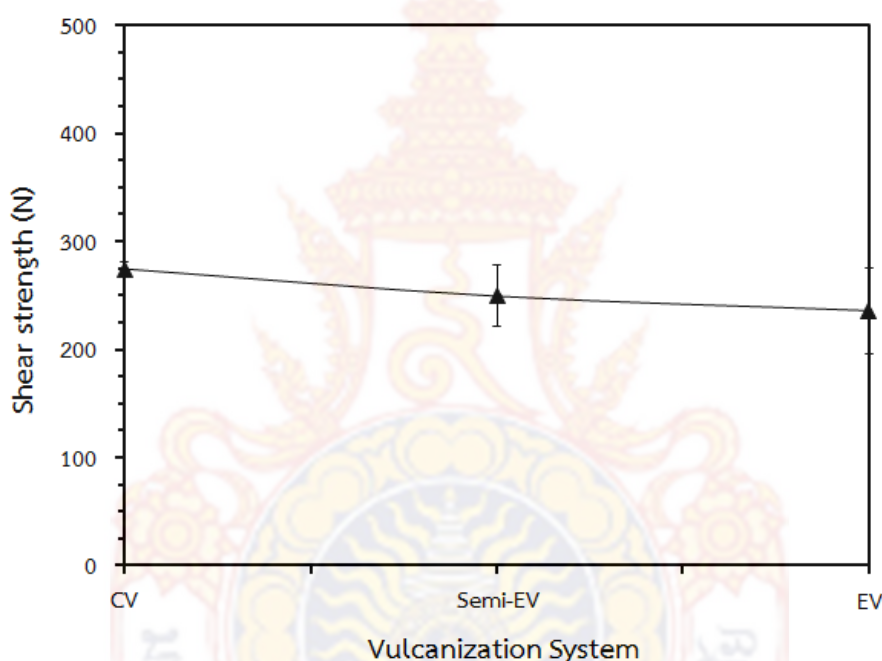


ภาพที่ 3.26 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)



### 3.3.5 สมบัติกาว

การทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว (shear strength) ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV) ดังภาพที่ 3.27 จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวดีกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่น โดยการวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกตินั้นทำให้กาวเกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลไฟดิกซึ่งมีความแข็งแรงสูง และระบบปกติจะมีความหนาแน่นของปริมาณพันธะการเชื่อมโยงสูง ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อกาวสูงทำให้มีประสิทธิภาพการยึดติดที่ดี ส่งผลให้การทดสอบความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวของกาวที่ได้มีสมบัติที่ดีในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



ภาพที่ 3.27 ความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติ (CV), กึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และประสิทธิภาพ (EV)

จากการศึกษาการเตรียมกาวไม้จากยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ผสมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ได้มีการเปรียบเทียบสมบัติกาวที่เตรียมได้ โดยเลือกสูตรกาวยางที่ให้สมบัติดีที่สุดจากการศึกษาคือสูตรที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV ที่มีการกราฟต์ยางรีเคลมด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ 4 phr และใช้ยางรีเคลมกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 20 phr เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวยาง (มอก.521-2527) แสดงดังตารางที่ 3.7 จากผลพบว่ากาวยางที่ได้จากการศึกษานี้ผ่านมาตรฐานในผลที่ได้มีการทดสอบคือปริมาณเนื้อกาว ความหนืดและความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาว

ตารางที่ 3.7 สมบัติพื้นฐานของกาวยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผสม Ma-g-RR ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวยาง (มอก.521-2527)

สมบัติ	เกณฑ์มาตรฐาน	กาวยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสม Ma-g-RR
ปริมาณเนื้อกาว (%TSC) ไม่ต่ำกว่า	15	25
ความหนืด shear strength (KPa) ไม่ต่ำกว่า	1500-5000	1600 - 1700
Peel strength (N/25 mm) ไม่ต่ำกว่า	220	480
การทนน้ำ (KPa) ไม่ต่ำกว่า	50	-
	220	-



## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่ายางรีเคลมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยทำการศึกษาสัดส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางรีเคลมต่อสมบัติของกาวไม้ โดยใช้ปริมาณยางรีเคลมที่ปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 40 phr พบว่าในปริมาณรีเคลมที่ 20 phr นั้นจะให้สมบัติของกาวยางที่ดีที่สุด โดยจะให้สมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ดีและจะให้สมบัติค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวที่ดีที่สุด เกิดจากการที่ยางรีเคลมส่งผลทำให้ความหนาแน่นของปริมาณพันธะการเชื่อมโยงสูงขึ้น ความแข็งแรงของเนื้อยางกาวสูงขึ้น จึงทำให้สมบัติของกาวดีขึ้น จึงได้ทำการเลือกใช้ปริมาณของยางรีเคลมที่ 20 phr และเมื่อนำยางรีเคลมมากราฟด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ ในปริมาณที่ 0, 4, 6, 8 และ 10 phr พบว่าเมื่อปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นนั้น เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นกรดของมาลิกแอนไฮไดรด์นั้น เป็นเสมือนสารหน่วงปฏิกิริยาทำให้การเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางช้าลง ซึ่งการกราฟมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 4 phr นั้นจะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวที่ดีที่สุด การกราฟต์ยางรีเคลมด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ จะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกราฟต์นั้นจะไปเพิ่มความเข้มข้นของยางรีเคลมทำให้มีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติมาลิกเอตเกิดอันตรกิริยาที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งทำให้มีความเข้ากันได้กับไม้ซึ่งมีความเป็นขี้ผึ้งผลให้สมบัติของกาวดีขึ้น แต่ในกราฟต์นั้นพบว่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดคือที่ 4 phr เนื่องจากหากปริมาณที่สูงมากกว่านั้น ยางจะมีความเป็นขี้ผึ้งส่งผลให้การละลายในตัวทำละลายทุโลอินน้อยลงหรือไม่ละลาย และในการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ ต่อสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางรีเคลมที่กราฟต์นั้น ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV จะใช้เวลาเวลาการสกอ์ชและเวลาการวัลคาไนซ์น้อยที่สุด โดยพบว่าระบบที่มีอัตราส่วนปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งมากที่สุด จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เร็ว เนื่องจากปริมาณของกำมะถันเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์มากกว่าปริมาณของสารตัวเร่ง รวมไปถึงปริมาณความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยงเช่นกัน ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และ EV เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV จะทำโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกที่สูง ซึ่งการที่มีพันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกจะให้สมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรงสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่นๆ ซึ่งทำให้ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงเฉือนของกาวเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

ควรเตรียมกาวที่สามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อความสะดวกและเหมาะสมในการทำงานมากยิ่งขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- โครงการการพัฒนาการทอผ้าไหม 2561. งานอุตสาหกรรมวัสดุทดแทนไม้และกาบตีไม้. สำนักงาน ทดแทนวิจัยและพัฒนาการป่าไม้.
- ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์ 2555. “ยางรีเคลมกับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น” .วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. ปีที่ 3 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2552.
- เบญจ ทองนวลจันทร์ และคณะ 2549. “กาวยางธรรมชาติอ็อกไซด์สำหรับตีประสานงานไม้” งานวิจัยยางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2549
- ยางรีเคลมกับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น. วารสาร Polymers & Tyre Asia. ฉบับเดือนเมษายน- พฤษภาคม 2554
- แวอาแซ แวหามะ และคณะ 2558. “กาวยางธรรมชาติทนไฟ : สารช่วยทนไฟชนิดที่ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสและปราศจากสารประกอบฮาโลเจน”. กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- สรารุช ประเสริฐสร และคณะ 2559. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สิริวรรณ พงษ์สถิตย 2558. “การศึกษาการกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติโดยการฉาย รังสีแกมมา”. สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- นิรนาม . กาว . เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง . [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.gluguru.com,2005>
- นิรนาม. ยางธรรมชาติอ็อกไซด์. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstreamChapter2.pdf.com>
- นิรนาม. ยางรีเคลม [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก. <http://www.thairubbersourcing.com>
- นิรนาม. เครื่อง Oscilating Disc Rheometer [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก. <http://www.dss.go.th>
- นิรนาม . เครื่อง Mooney Viscometer [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก . <http://www.alpha-technologies.com>
- นิรนาม. เครื่อง Hardness Tester [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก. <http://www.aballtechno.com>
- นิรนาม . เครื่อง Universal Tensile testing machine [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก . <https://www.cometech.com>
- นิรนาม. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก . <http://www.physics.sci.ku.ac.th>
- นิรนาม. เครื่อง Brookfield [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก. <http://viscometer.blogspot.com>
- Kalkornsurapranee, E., Vennemann, N., Kunmerlowe, C., and Nakason, C. 2012. Novel Thermoplastic Natural Rubber Based On Thermoplastic Polyurethane Blends, Influence Of Modified Natural Rubbers On Properties of the Blends.Lranian Polymer Journal, 21(10), 689-700. 47

- Nelson, P.A. and Kutty, S.K.N. 2002. "Studies on Maleic Anhydride Grafted Reclaimed Rubber/Acrylonitrile Butadiene Rubber Blends". Department of Polymer Science and Rubber Technology, Cochin University of Science and Technology Cochin. 2003.
- Rabiei, S. and Shojaki, A. 2016. "Vulcanization kinetics and Reversion Behavior of Natural Rubber/Styrene Butadiene Rubber Blends Filled With Nanodiamond-The Role of Sulfue Curing System. European Polymar Journal, 81,98-113
- Sadequl, A.M., Ishiaku, U.S., Ismail, H., and Poh, B.T. 1998. The Effect ofAccelerator/Sulphur Ratio On The Scorch time of Epoxidized Natural Rubber. European Polymar Journal, 34 (1), 51-57.

