



## รายงานการวิจัย

การเตรียมแผ่นกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเศษกระดาษ  
เหลือใช้ในสำนักงาน

PREPARATION OF LEATHERETTE PAPER FROM NATURAL  
RUBBER FILLED OFFICE PAPER WASTE

สุรเดช มัจฉาเวช

Suradet Matchawet

อุไรวรรณ สุกยัง

Uraiwan Sookyung

สุวัฒน์ รัตนพันธ์

Suwat Rattanapan

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2562

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2562 เป็นงานวิจัยพื้นฐานเพื่อก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการประเมินความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ ตลอดจนผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางส่งเสริมให้มีการนำเศษขยะกระดาษที่เหลือใช้ในสำนักงานนำมาใช้ประโยชน์ร่วมกับยางธรรมชาติ ช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้สูงขึ้น

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ได้ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ทั้งความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ ตลอดจนสถานที่ในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้การช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัยที่อุทิศกำลังกายและกำลังใจในการวิจัยครั้งนี้ลุล่วงได้ด้วยดี ตลอดจนครอบครัวและผองเพื่อนที่ให้ความหวังใจเป็นกำลังใจให้เสมอมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านและหน่วยงาน ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุรเดช มัจฉาเวช  
อุไรวรรณ สุขยัง  
สุวัฒน์ รัตนพันธ์  
ธันวาคม 2562



## การเตรียมแผ่นกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเศษกระดาษเหลือใช้ใน สำนักงาน

สุรเดช มัจฉาเวช อุไรวรรณ สุกยง และสุวัฒน์ รัตนพันธ์

### บทคัดย่อ

เตรียมแผ่นกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเศษกระดาษเหลือใช้ในสำนักงานเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ได้ทำการศึกษาลักษณะและปริมาณของเส้นใยกระดาษโดยแปรปริมาณที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr โดยแปรขนาด 20 และ 40 เมช พบว่าเส้นใยกระดาษ ทั้ง 2 ขนาด คือที่ 20 และ 40 เมช เมื่อปริมาณของเส้นใยกระดาษเพิ่มขึ้น เวลาสกอช เวลาวัลคาไนซ์ ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาดและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด มีค่าลดลง ส่วนค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ 300 เปอร์เซ็นต์ ค่าการบิดรูปเนื่องจากการกด ค่าความแข็งและค่าความทนทานต่อการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษด้วยโซเดียมซัลไฟต์และแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าเส้นใยกระดาษที่ปรับสภาพผิว เวลาสกอช เวลาวัลคาไนซ์ ค่าความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าการบิดรูปเนื่องจากการกด มีค่าลดลงซึ่งในส่วนของค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ 300 เปอร์เซ็นต์ ค่าความทนทาน ต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดและค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ได้ทำการเลือกใช้ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการใช้จะทำการศึกษาที่ 0, 4, 8 และ 12 phr พบว่า เวลาสกอช เวลาวัลคาไนซ์ ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์และ 300 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ส่วนค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด ค่าความทนทานต่อการสึกหรอและการบิดรูปหลังจากการกดมีค่าลดลง และจากการศึกษาอิทธิพลของคอมโพสิตที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า พบว่าค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์และค่าความแข็งมีค่าสูงกว่ากระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้แต่ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาดและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้มีค่าที่สูงกว่ากระดาษหนังเทียมในทางการค้า

คำสำคัญ: กระดาษหนังเทียม ยางธรรมชาติ กระดาษเหลือใช้

## Preparation of Leatherette Paper from Natural Rubber filled Office Paper Waste

Suradet Matchawet, Uraiwan Sookyung and Suwat Rattanapan

### Abstract

Leatherette paper from natural rubber filled office paper waste was prepared. Influences of sizes (i.e., 20 and 40 mesh) and contents (i.e., 0, 10, 20, 30 and 40 phr) of paper fiber were investigated. It was found that the scorch time, cure time, tensile strength, elongation at break and tear strength decreased but the modulus at 100% and 300%, compression set, hardness and abrasion resistance increased with increasing paper fiber content in both sizes of filled paper fiber. In addition, influence of treated paper fiber with sodium silicate and sodium chloride were studied. The results showed that the scorch time, cure time, abrasion resistance and compression set decreased but the modulus at 100% and 300%, tensile strength, elongation at break, tear strength and hardness tended to increase because of the paper fiber treatment. The effect of compatibilization between natural rubber and paper fiber by using epoxidize natural rubber containing 25% and 50% mol epoxide (at 0, 4, 8, 12 phr) was also investigated. It was found that the addition of epoxidized natural rubber in the rubber composites caused to increase scorch time, cure time, modulus at 100% and 300%, hardness and tear strength but decrease tensile strength, elongation at break, abrasion resistance and compression set. Furthermore, the leatherette paper from rubber composites was compared with commercial leatherette paper. The modulus at 100% and hardness of commercial leatherette paper were found higher than that of rubber composites. However, tensile strength, elongation at break and tear strength of rubber composites were higher than commercial leatherette paper.

Key word: Leatherette paper, Natural rubber, Paper waste

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 ทฤษฎี	2
1.2.1 ยางธรรมชาติ (NR)	2
1.2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR)	5
1.2.3 กระดาษ (Paper)	7
1.2.4 กระดาษหนังเทียม (Leatherette paper)	9
1.2.5 ยางคอมปาวด์ (Rubber compound)	9
1.2.6 ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized rubber)	11
1.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	17
1.5 ขอบเขตของโครงการ	17
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	17
บทที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย	18
2.1 ยางและสารเคมี	18
2.2 อุปกรณ์	18
2.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	20
2.4 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง	21
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	24
3.1 อิทธิพลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ	24
3.2 อิทธิพลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ	33
3.3 อิทธิพลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ	39
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
4.1 สรุปผลการทดลอง	56
4.2 ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	59



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สูตรยางที่ใช้ในการเตรียมกระดาษหนังเทียม	20
2.2	ลำดับขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี	21
3.1	สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ขนาด 20 เมชและ 40 เมช ในปริมาณต่าง ๆ	25
3.2	สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ	27
3.3	สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ (ต่อ)	27
3.4	สเปกตรัมแสดงช่วงเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเส้นใยกระดาษ	34
3.5	สมบัติการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติที่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษและยางธรรมชาติที่ไม่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษ	35
3.6	สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิว	36
3.7	สมบัติการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่เติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์	40
3.8	สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์	42
3.9	สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ต่อ)	42
3.10	สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า	52

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	2
1.2	5
1.3	6
1.4	7
1.5	8
1.6	10
3.1	24
3.2	26
3.3	28
3.4	29
3.5	30
3.6	31
3.7	32
3.8	33
3.9	35
3.10	36
3.11	37
3.12	38



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดและค่าความแข็งของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับและไม่ปรับสภาพผิว	39
3.14 อิทธิพลของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ในช่วงระยะเวลาที่ย่างเกิดการวัลคาไนซ์	40
3.15 อิทธิพลของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ในช่วงระยะเวลาที่ย่างเกิดการวัลคาไนซ์	41
3.16 ค่า 100% โมดูลัสที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	43
3.17 อันตรกิริยาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับเส้นใยกระดาษ	44
3.18 ค่า 300% โมดูลัสที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	45
3.19 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	46
3.20 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	47
3.21 ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	48
3.22 ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	49
3.23 ค่าความทนทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	50
3.24 ค่าการผิดรูปเนื่องการกดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์	51
3.25 ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% ของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนึ่งเทียมในทางการค้า	53
3.26 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนึ่งเทียมในทางการค้า	53
3.27 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนึ่งเทียมในทางการค้า	54

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.28	54
3.29	55



# บทที่ 1

## บทนำ

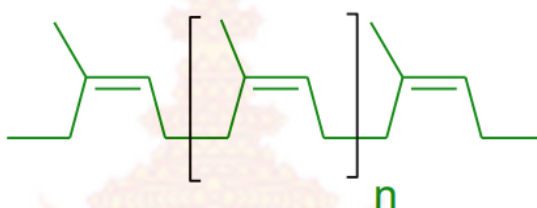
### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้งานของกระดาษที่ผลิตออกมาในรูปของผลิตภัณฑ์มีเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจำนวนกระดาษที่ผลิตออกมามีจำนวนไม่ถึง 30 เปอร์เซ็นต์หลังจากการใช้แล้วจะถูกนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้ง หรือที่เรียกว่า Recycle นอกจากนี้อาจมีการนำกระดาษมาใช้ซ้ำโดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปหรือแปรรูปที่เรียกว่า Reuse อย่างไรก็ตามอัตราการนำกระดาษไปใช้ประโยชน์ใหม่ยังคงเป็นอัตราที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของกระดาษที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ หากไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์กระดาษที่เหลือก็จะกลายเป็นขยะที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการนำไปกำจัดด้วยวิธีการเผา การฝังกลบ หรือการกำจัดไม่ถูกวิธี ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวคิดเพื่อเพิ่มมูลค่าของกระดาษที่ใช้แล้วให้มากขึ้นโดยการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ จากลักษณะของเนื้อเยื่อกระดาษที่ผลิตมาจากเยื่อไม้ซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลส สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และมีราคาต่ำ จึงมีโอกาสนำมาใช้ประโยชน์เป็นสารตัวเติมได้ โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเส้นใยกระดาษจากเศษกระดาษที่ใช้งานในสำนักงาน นำมาเตรียมเพื่อจะนำไปเติมลงไปในคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ ร่วมกับสารเคมีต่าง ๆ และมีการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อให้ใช้งานในรูปของกระดาษหนึ่งเทียมได้ ซึ่งโดยทั่วไปกระดาษหนึ่งเทียมที่ใช้ส่วนใหญ่จะต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ และจะผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิยูรีเทน หรือ พอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารตั้งต้นมาจากปิโตรเลียม โดยวัสดุจากปิโตรเลียมนี้จะสร้างมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นการนำยางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นวัตถุดิบหลักในประเทศไทยที่มีการผลิตและส่งออกมากที่สุดในโลก แต่มีปัญหาเรื่องราคายางดิบตกต่ำ มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ การนำเส้นใยกระดาษมาใช้ในการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ นอกจากเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลของยางธรรมชาติแล้วยังมีผลต่อการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษกระดาษที่เหลือใช้ โดยเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เป็นการลดต้นทุนในการผลิตแก่ภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากการเป็นเศษกระดาษที่ใช้แล้วและยังมีราคาถูก นอกจากนี้เป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะ และสามารถเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติให้มากขึ้นได้อีกด้วย ดังนั้นจึงได้ศึกษาการนำกระดาษที่ไม่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ใหม่เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อทำผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีราคาถูก ทำให้สามารถลดต้นทุนผลิตภัณฑ์จากยางพารา เพิ่มมูลค่ากระดาษลดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยการย่อยกระดาษให้มีขนาดอนุภาคเล็ก หรือทำให้มีสภาพเป็นเยื่อกระดาษก่อน แล้วนำมาผสมเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

## 1.2 ทฤษฎี

### 1.2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติเป็นยางที่ได้จากต้นพืชในสกุล *Hevea brasiliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มน้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทางเคมีคือ  $C_5H_8$  มีชื่อเรียกว่า ไอโซพรีน (isoprene) และมีการจัดเรียงตัวโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นแบบ cis-1,4-polyisoprene มีสูตรโครงสร้าง แสดงดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene)  
แหล่งที่มา : นิธินาถ (2557)

สมบัติของยางธรรมชาติมีอิทธิพลจากลักษณะของโครงสร้างของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติมีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วนทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกทั้งสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ส่งผลให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีค่า  $T_g = -72\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอีนและยางซิลิโคนเท่านั้น นอกจากนี้แล้วความความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ เมื่อถูกยืดทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก (นิธินาถ, 2557)

ยางธรรมชาติหรือยางพารามีการนำมาทำผลิตภัณฑ์มานานแล้ว ตั้งแต่ พ.ศ.2382 ชาลส์ กู๊ดเยียร์ ได้พบวิธีการวัลคาไนซ์อย่างด้วยกำมะถัน ทำให้ยางมีสมบัติที่ดีขึ้นอย่างมาก กล่าวคือเมื่อยางได้รับความร้อนยางจะไม่เหนียว อากาศเย็นก็ไม่แข็งเปราะ ไม่บวมพองในตัวทำละลาย มีสมบัติยืดหยุ่นดี ทำให้มีการนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยมา ดังนั้นการผลิตยางธรรมชาติในรูปของวัตถุดิบจึงไม่เพียงพอกับความต้องการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นเหตุให้ราคายางดิบเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แม้ว่าในบางครั้งราคายางอาจมีการเปลี่ยนแปลงลดต่ำลงบ้างแต่ก็ยังค่อนข้างสูง การลดราคาต้นทุนของวัตถุดิบยางพาราสามารถทำได้โดย การใส่สารตัวเติมที่มีราคาถูกเพิ่มลงไปยางธรรมชาติ (เสาวนีย์, 2008)

### 1.2.1.1 สมบัติทั่วไปของ NR

1. ความยืดหยุ่นแบบยาง (rubber elasticity) สมบัติดังกล่าวเป็นลักษณะเด่นของ NR ดังกล่าวคือ NR ที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

2. ความเหนียวติดกัน (tack) NR (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของ NR มีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ NR สามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น NR จึงมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้ นอกจากนี้จะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

4. ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจาก NR สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น NR จึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

5. สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) NR มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ NR ยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

6. ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) NR มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายางสไตรีนบิวตาไดอีน (styrene-butadiene rubber, SBR) เล็กน้อยอย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ พบว่า NR มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

7. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) NR มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมากโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 10<sup>15</sup> หรือ 10<sup>16</sup> ohm.cm

8. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid และ chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของ NR เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง จึงทำให้ NR ไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ NR ยังทนต่อกรดและด่างได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

9. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด เนื่องจากโมเลกุลของ NR มีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางอ่อนไหวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยา

ออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น NR จึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ NR ยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อถูกดั่งยึดและได้รับโอโซนนาน ๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณผิวในทิศทั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง ดังนั้น ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants)) และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของ NR

10. การห้กงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) NR ยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการห้กงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ซึ่งยางที่มีสมบัติที่ดีกว่า NR มีเพียง 2 ชนิดคือ ยางบิวตาไดอีน (butadiene rubber) และยางซิลิโคน (silicon rubber)

11. การเสีรูปล้หลังการกดอัด (compression set) NR มีค่าการเสีรูปล้หลังการกดอัดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม ค่าการเสีรูปล้หลังการกดอัดที่อุณหภูมิต่ำของ NR จะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีรูปล้หลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงของ NR มีค่าสูงขึ้นเนื่องจาก NR ไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพส่งผลให้สมบัติด้านการเสีรูปล้หลังการกดอัดด้อยลง

12. การกระดอน (rebound resilience) NR มีสมบัติการกระดอนสูง และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี hysteresis ต่ำ) NR จึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีการสะสมความร้อนสูงก็จะทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

13. อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature) NR สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-55^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $70^{\circ}\text{C}$  หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนาน ๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) NR อาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง  $90^{\circ}\text{C}$  หรืออาจสูงถึง  $100^{\circ}\text{C}$

#### 1.2.1.2 การใช้งานของ NR

ในอดีต NR จัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากมายเนื่องจาก NR มีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตาม NR ก็มีข้อด้อยหลักคือ ไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่น ๆ ดังนั้น ยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนที่ NR ผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทยังคงจำเป็นต้องใช้ NR เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

1. NR มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารตัวเติมเสริมแรง และมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถังมียาง ถังยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

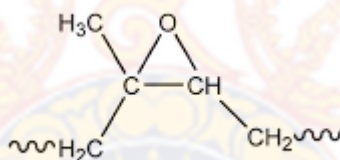
2. NR มีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์

หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน สายยาง ยางกันกระแทกทำเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. NR มีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน งามที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

### 1.2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR)

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นยางชนิดใหม่ที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) โดยระดับการเกิดอีพอกซิเดชันตั้งแต่ 10-50% ยางที่ได้จะมีความเป็นขี้สูงกว่ายางธรรมชาติอีกทั้งยังทนความร้อนและน้ำมันได้ดีขึ้นโดยที่ยางเกรดที่มีระดับของอีพอกซิเดชันสูงถึง 50% จะมีความเป็นขี้ใกล้เคียงกับยาง NBR ที่มีระดับอะโครโลไนไตรล์ ปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่ายาง ENR ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจะมีสมบัติคล้ายกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำอีกด้วย



ภาพที่ 1.2 สูตรโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์  
แหล่งที่มา : กิติกร (2560)

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีการผลิตในทางการค้า เช่น ENR25 หรือ ENR50 หมายถึงยางธรรมชาติที่มีจำนวนโมล 25% และ 50% ที่เกิดการอีพอกซิเดชันโดยเมื่อเปอร์เซ็นต์การอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ความเป็นขี้ของยาง ENR มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงให้สมบัติของยางเปลี่ยนไป เช่น มีความทนทานต่อน้ำมันมากขึ้น สามารถเข้ากันได้ดีกับยางหรือพอลิเมอร์ที่มีขี้มากขึ้น เป็นต้น

#### 1.2.2.1 การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

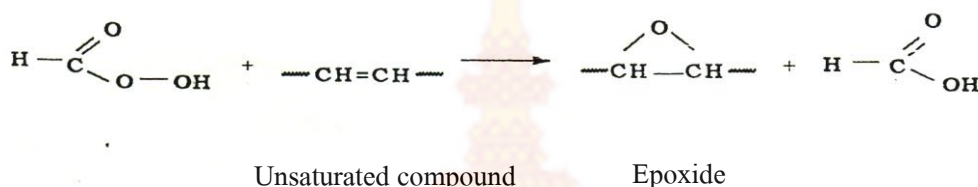
การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ สามารถเตรียมได้ 2 วิธี คือ

##### 1.2.2.1.1 กรณีน้ำยาง

1. **น้ำยางที่ใช้เพื่อปรับสภาพโครงสร้าง** จะต้องทำให้อนุภาคยางมีความเสถียรก่อนเพื่อให้น้ำยางเกิดการรวมตัวเป็นก้อนโดยการใส่สารปรับสภาพผิวอนุภาคยาง เช่น สารเพิ่ม

ความเสถียรชนิดไม่มีประจุ (Non-Ionic Surfactant) ประเภทเอทิลีนออกไซด์ซึ่งสารเคมีนี้จะสูญเสียสภาพความเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส)

2. **เตรียมสารละลายกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี (Peroxyformic Acid)** เพื่อใช้ในการอีพอกซิไซด์อย่างธรรมชาติโดยการใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2-0.5 กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากันเกิดกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซีและน้ำ



ภาพที่ 1.3 การเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน  
แหล่งที่มา : Baker *et al.*, (1985)

3. **การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยวิธีการใช้กรดเปอร์ฟอร์มิก (performic acid epoxidation)** เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ด้วยวิธีการใช้กรดเปอร์ฟอร์มิก

อิทธิพลของสารเคมีและเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน เตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยใช้ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิก ทำการเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกก่อนที่จะผสมลงไป ในปฏิกิริยา เริ่มจากนำน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงมาเจือจางโดยแปรปริมาณเนื้อยางแห้งเป็น 10, 15 และ 20% เติมน้ำยางที่ปรับปริมาณเนื้อยางแห้งแล้วลงในปฏิกรณ์ที่มีเครื่องกวนปรับอุณหภูมิให้ได้ 30 องศาเซลเซียส แล้วเติมสบู่มีลวินดับบลิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางจับตัวขณะทำปฏิกิริยา กวนให้เข้ากัน ประมาณ 20 นาที จากนั้นเติมกรดเปอร์ฟอร์มิก ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เวลาต่างๆ คือ 4, 6, 24, 30, 48, 54, 70, 80 ชั่วโมงโดยใช้เวลาที่น้ำยางเสียสภาพโดยเกิดการจับตัวในขณะที่ทำปฏิกิริยาเป็นเวลาสูงสุดของการทำปฏิกิริยา นำตัวอย่างน้ำยางที่ได้จากระยะเวลาต่างๆไปจับตัวด้วยเมทานอลรีดให้เป็นแผ่นบางๆ ล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้งหลังจากนั้นเอาไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่แห้งแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ด้วยเครื่องอินฟราเรด สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (วัชรินทร์, 2545)

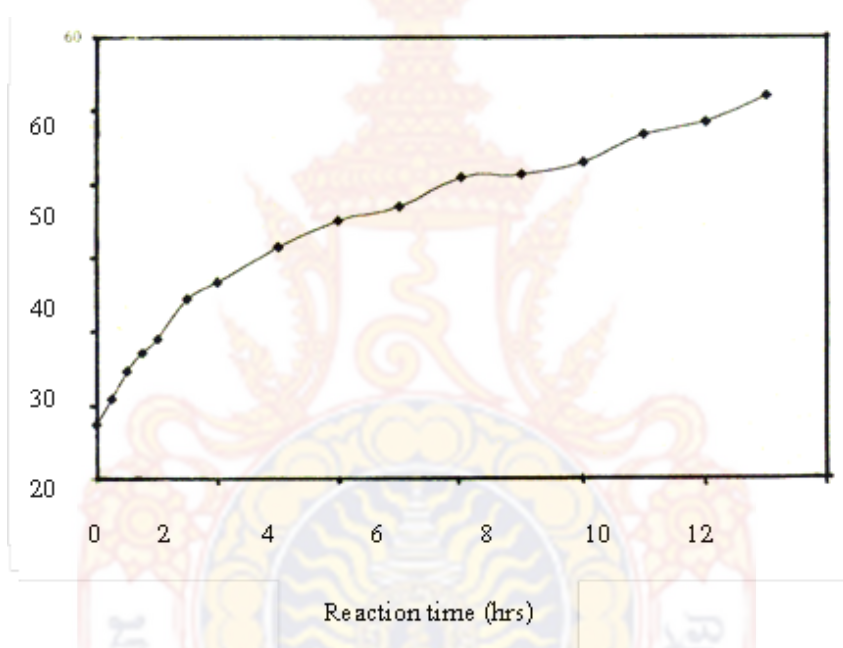
4. **เติมสารละลายกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี** ลงไปในน้ำยางที่ปรับสภาพผิวอนุภาคเรียบร้อยแล้วจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันกับยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียสเกิดเป็นยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างยาง



ธรรมชาติ และได้กรดฟอร์มิกกลับคืนมา ยางธรรมชาติจะเกิดการอพอกซีเดชันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารเปอร์ออกไซด์

**5. เมื่อน้ำยางอพอกซีเดแล้ว** ต้องทำเป็นกลางด้วยต่างก่อนที่จะทำให้น้ำยางเกิดการจับตัวเป็นก้อนด้วยน้ำร้อน ต่อจากนั้นจึงล้างยางธรรมชาติอพอกซีเดด้วยน้ำและทำให้แห้งด้วยอากาศร้อน

**1.2.2.2.2 กรณีใช้ยางแห้ง** ยางแห้งที่จะนำมาทำให้เกิดการอพอกซีเดชัน จำเป็นต้องทำให้เป็นสารละลายยางก่อน โดยการนำยางมาละลายในน้ำมันสน โทลูอีน หรือ เบนซินต่อจากนั้นจึงเติมสารอพอกซีเดซีโมเลกุลของยางธรรมชาติ เช่น กรดเปอร์ออกซีเบนโซอิก หรือกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี เช่นเดียวกับน้ำยาง (ปราณี, 2544)



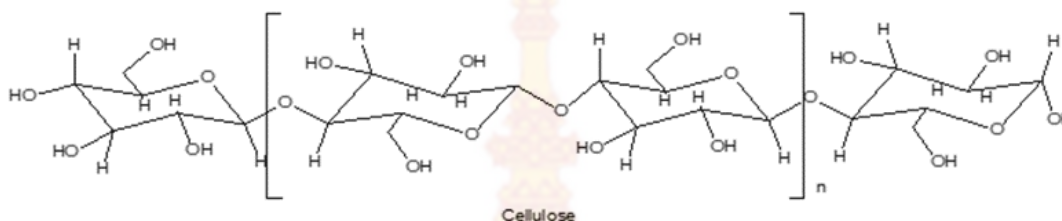
ภาพที่ 1.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปอร์เซนต์โมลอพอกซีเดกับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา อพอกซีเดชันด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก

แหล่งที่มา : อาชีชัน และคณะ (2548)

### 1.2.3 กระดาษ (Paper)

กระดาษ หมายถึง วัสดุที่ได้จากการสานอัดแน่นของเส้นใยจากพืชเป็นแผ่นบาง ๆ โดยทั่วไปมีความหนาไม่เกิน 0.012 นิ้ว ซึ่ง The International Organization for Standardization (ISO) กำหนดว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมากกว่า 250 กรัมต่อตารางเมตร หรือ 51 ปอนด์ต่อ 1,000 ตารางฟุต เรียกว่า กระดาษแข็ง (paperboard) การกำหนดลักษณะเฉพาะ (characteristic) ของกระดาษ นิยมใช้ความหนา หรือน้ำหนักต่อพื้นที่ ได้แก่ แกรมเมจ (grammage) แสดงเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรือน้ำหนักมาตรฐาน (basic weight) แสดงค่าเป็นปอนด์ต่อ 1,000 ตารางฟุต

เส้นใยจะประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสมาเรียงต่อกัน กับเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างโมเลกุลของกลูโคสและน้ำตาลอื่น ๆ เช่น แมนโนส (mannose) ฟูโคส (fucose) ไชโลส (xylose) มาต่อกัน เส้นใยยังมีส่วนที่เป็นลิกนิน (lignin) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยให้อยู่ด้วยกัน ในขบวนการผลิตกระดาษ ลิกนินจะถูกขจัดออกจากเยื่อกระดาษ หากมีลิกนินหลงเหลืออยู่ในกระดาษ จะทำให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสง



ภาพที่ 1.5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของกระดาษ

กระดาษเป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่มีการนำมาใช้ในชีวิตประจำวันค่อนข้างมาก โครงสร้างแผ่นกระดาษประกอบด้วยเส้นใย หรือไฟเบอร์ที่มีการยึดประสานกันของเส้นใยเอง ไม่ได้เกิดจากการใส่สารยึดติดประสานการผลิตและใช้งาน กระดาษมีมานานแล้วตั้งแต่ปี พ.ศ. 658 โดยขุนนางจีนชื่อ ไช่หลุน ได้ค้นพบวิธีการทำกระดาษจากใยต้นหม่อน แห้วปลาลา เศษผ้า และเศษปอ หรือสิ่งต่าง ๆ ที่มีลักษณะเนื้อเป็น เส้นใย โดยเอามาบดให้ละเอียด ใส่ น้ำ ฟอกสี เติมสารเคลือบเนื้อเส้นใยเพื่อไม่ให้ดูดน้ำหนักมากเกินไปเวลาเขียน แล้วนำมารีดเป็นแผ่น ช่วงก่อนปี พ.ศ. 2393 มีการใช้เศษลินินและเศษฝ้ายทำกระดาษที่มีคุณภาพ ดีเยี่ยม การใช้กระดาษจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ต้องหาวัตถุดิบอย่างอื่นมาใช้แทนคือ เยื่อไม้จากต้นไม้เนื้ออ่อน เช่น ต้นสน สำหรับปัจจุบันวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษส่วนใหญ่คือเส้นใยที่ได้จากต้นไม้ ซึ่งจะมีทั้งเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว รวมทั้งมีสารอื่นที่เติมลงไป ได้แก่ สารต้านทานการซึมน้ำ สีย้อม สารเพิ่มความเหนียว สารควบคุมจุลชีวะ (biocide) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกระดาษจึงมีการผลิต ขึ้นมาใช้หลากหลายชนิด เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษเครื่องเขียนขนาดต่าง ๆ กระดาษบันทึก กระดาษสำเนา กระดาษพิมพ์ดีด กระดาษคอมพิวเตอร์และกล่องกระดาษ เป็นต้น หากทิ้งไปก็กลายเป็นขยะอยู่ในแหล่งทิ้งขยะ เป็นการใช้ทรัพยากรที่สิ้นเปลืองที่สุด ทั้งนี้ในกองขยะทั่วไปเกือบครึ่งหนึ่งเป็นขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งแยกเป็นกระดาษ 19% พลาสติก 13% แล้ว 8% โลหะ 5% จะเห็นว่าขยะกระดาษมีจำนวนมากที่สุด คิดเป็นขยะที่เกิดขึ้นทั่วประเทศประมาณ 2.47 ล้านตัน ซึ่งเศษกระดาษเหล่านี้ควรถูกรวบรวมป้อนให้แก่โรงงานผลิตกระดาษ เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษรีไซเคิล ซึ่งโรงงานผลิตกระดาษมีความต้องการเศษกระดาษปีละ 2.5 ล้านตัน แต่เรากลับสามารถหาเศษกระดาษภายในประเทศป้อนโรงงานได้ไม่ถึงร้อยละ 50 ที่เหลือต้องนำเข้าเศษกระดาษจากต่างประเทศ จึงเป็นเรื่องที่น่าเศร้าที่ประเทศไทยต้องนำเข้าเศษกระดาษกว่าปีละ 1 ล้านตัน ทั้ง ๆ ที่มีขยะกระดาษภายในประเทศถึงปีละ 2.7 ล้านตัน ดังนั้นทางที่ดีที่จะทำให้มีการนำกระดาษใช้แล้วมาหมุนเวียนผลิตมาใช้ใหม่ (Recycle) มีปริมาณมากขึ้นก็คือ การรวบรวมเศษกระดาษใช้แล้วในสำนักงานและ

บ้านเรือน โดยแยกแยะเศษกระดาษเหล่านี้ออกจากขยะชนิดอื่นเพื่อสะดวกในการจัดเก็บและนำกลับไปรีไซเคิล เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในทางเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และทรัพยากรธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีการศึกษานำกระดาษที่ใช้แล้วนำมาเสริมประสิทธิภาพในยาง พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติฟิสิกส์ของยางได้ ฉะนั้นการนำกระดาษมาใช้ประโยชน์ใหม่จึงเป็นที่น่าสนใจ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2558: ออนไลน์)

### 1.2.4 กระดาษหนังเทียม (Leatherette paper)

กระดาษหนังเทียม คือกระดาษที่ใช้ผลิตกระดาษหนังเทียม ทำจากเยื่อหลายชนิด ได้แก่เยื่อไม้ เศษผ้าและป่านปอ อาจใส่น้ำยาก่อนทำแผ่นหรือภายหลัง หรืออาจแช่แผ่นกระดาษด้วยสารประกอบของยางก็ได้

#### การใช้งานกระดาษหนังเทียม

งานหุ้มบรรจุภัณฑ์ลักษณะกล่อง ถุงแบรนต์ ทำปกวิทยานิพนธ์ งานหุ้มปกหนังสือ ปกนอก ปกใน สตูดิโอเนอร์ ปกแฟ้ม ปกสมุด ซองจดหมาย การ์ด แปกเกจจิ้งและงานครีเอทต่างๆ

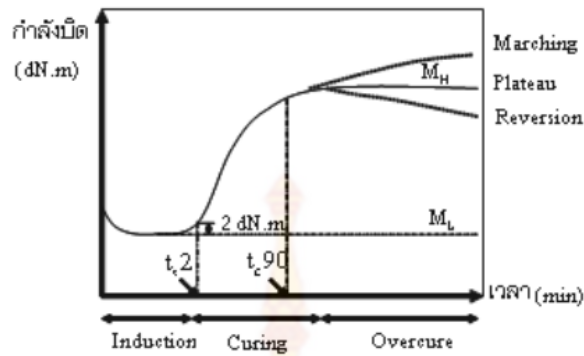
### 1.2.5 ยางคอมปาวด์ (Rubber compound)

ยางคอมปาวด์ (rubber compound) คือ ยางที่มีการผสมสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่ง ปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ยางล้อ ถุงมือ ยางยานยนต์ ยางรองคอสพาน ท่อ ยาง ยางรัดของ ฯลฯ

การจะผลิตยางคอมปาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกสูตรเคมียางและการผสมยาง เพื่อให้ได้ยางคอมปาวด์ที่นำไปขึ้นรูปและคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 1.2.5.1 การทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Oscillating Disk Rheometer, ORD)

เครื่อง ORD เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางโดยตรง ตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างดาดบนและดาดล่าง เช่นเดียวกับเครื่องมือวิสโคมิเตอร์ อย่างไรก็ตามโรเตอร์ของเครื่อง ORD มีรูปร่างเป็นรูปโคนคู่ประกบ และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่ง โดยการแกว่งของโรเตอร์จะเกิดขึ้นเป็นมุมแคบๆ 100 รอบต่อนาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยางวัลคาไนซ์ จากนั้นเครื่องก็จะบันทึกแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการทดสอบซึ่งจะได้กราฟที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 1.6 แสดงกราฟการวัลคาไนซ์จากเครื่อง ODR

จากภาพที่ 1.6 จะเห็นได้ว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ คือ

1. ช่วงเริ่มต้น (induction) เมื่อยางได้รับความร้อน ยางก็จะนิ่มลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรก จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่นาน จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ใช้สัญลักษณ์ว่า  $M_L$

2. ช่วงการวัลคาไนซ์ (curing) หลังจากที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้น (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มบิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์เรียกว่า “ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time)” และใช้สัญลักษณ์เป็น  $t_s$  ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ  $1^\circ$  ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตัน-เมตร (dN.m) ใช้สัญลักษณ์ว่า  $t_{s,1}$  แต่ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ  $3^\circ$  ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตัน-เมตร และใช้สัญลักษณ์ว่า  $t_{s,2}$  ระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้น ๆ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต เมื่อทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับของการวัลคาไนซ์ จนกระทั่งถึงจุดที่การวัลคาไนซ์เกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า  $M_H$  ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงค่าโมดูลัสเฉือน ของยางวัลคาไนซ์ ณ อุณหภูมิของการทดสอบ ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการวัลคาไนซ์ก็คือ “ระยะเวลาของการวัลคาไนซ์ (cure time)” โดยทั่วไป ใช้สัญลักษณ์เป็น  $t_{c,x}$  เมื่อ  $x$  คือร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด ( $M_L$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดสูงสุด ( $M_H$ ) ซึ่งค่า  $t_{c,90}$  จัดเป็นค่า “ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม (optimum curing time)” หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ไปร้อยละ 90 หรือระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ ค่าแรงบิดต่ำสุดบวกด้วย 90% ของผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการวัลคาไนซ์ ณ จุดนี้จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ส่วนการวัลคาไนซ์ไปจนถึง 100% ส่วนใหญ่ มักจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของยางด้อยลง

$t_{c,90}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t_{c,90} = \text{ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ } M_L + [90 (M_H - M_L) / 100]$$

นอกจากตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถใช้แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง นั่นคือ ดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate index; CRI) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ  $CRI = 100 / (\text{ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม} - \text{ระยะเวลาสกอร์ช})$

3. ช่วงของการวัลคาไนซ์ที่มากเกินไป (overcure) เมื่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดหรือโมดูลัสของยางอาจจะคงที่ตามเวลา เรียกว่าเกิด “plateau” แต่ในบางกรณีอาจพบว่ามีค่าโมดูลัสของยางอาจจะสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เรียกว่าเกิด “marching” หรืออาจจะมีค่าต่ำลง เรียกว่าเกิด “reversion” ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรเคมีที่ใช้

## 1.2.6 ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized Rubber)

ผลิตภัณฑ์จากยางจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้จนกว่าจะผ่านการวัลคาไนซ์เสียก่อน ทั้งนี้เพื่อกำจัดความเหนียวติด (Tackiness) ของยางและปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น การวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเชื่อมโมเลกุลยางแต่ละโมเลกุลผ่านพันธะโควาเลนต์ให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ความเร็วในการเชื่อมโยงพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างการวัลคาไนซ์ เรียกว่า อัตราการวัลคาไนซ์ (Cure Rate) ในการวัลคาไนซ์ ยางจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่น ทนทาน และไม่เหนียวติด การวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้องจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ ซึ่งอาจต้องใช้เวลาหลายวันในการทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการวัลคาไนซ์ลง เราสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ให้สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิปกติที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะอยู่ที่ประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  ซึ่งที่อุณหภูมินี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับกำมะถันจะเป็นไปอย่างช้า ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวเป็นสารวัลคาไนซ์ จะให้สมบัติที่ไม่ดีทั้งในแง่ ความแข็งแรง และลักษณะภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีที่ เรียกว่า สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) เพื่อช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และมีการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้

### 1.2.6.1 สมบัติการดึง (Tensile Properties)

ยางมีความสามารถในการยืดให้ยาวหลายเท่าตัวแต่น้อยครั้งนักที่การใช้งานของยางอยู่ในรูปของการยืด ถึงกระนั้นก็ตามสมบัติของยางในการยืด-ดึง เป็นสมบัติพื้นฐานที่ได้ใช้กันมานานในอุตสาหกรรมยางเพื่อแสดงคุณภาพของยางเนื่องจากสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัดถ้าปริมาณสารตัวเติมหรือน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป หรือกระบวนการการผสมของยางหรือการวัลคาไนซ์เปลี่ยนแปลง

การดึงยางทำให้ยางยืดออกมาในลักษณะที่แรงที่ใช้ดึงกับความยืดไม่สัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงกัน (เหมือนสมบัติของโลหะทั่ว ๆ ไป) โดยการวัดโมดูลัสของยางโดยทั่วไป จะทำการวัดที่ระยะยืด 100% และ 300% ซึ่งหมายถึงความเครียดของยางที่ยืดออก 100% 300%

การทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐานสำคัญดังนี้

ISO 37-1977(E) Rubber, vulcanized-Determination of tensile stress-strain-Properties

BS 903 Part-A2:1956 Determination of stress-strain Properties

ASTM D 412-80 Rubber properties in Tension

JIS K 6301-1975 Tension Test

การทดสอบมีจุดมุ่งหมายเพื่อวัดความเค้นดึงที่ส่วนยืดค่าหนึ่ง (Modulus) วัดความต้านทานต่อแรงดึง วัดความยืดจนขาด และความคงรูปภายหลังจากการดึงเป็นหลัก การทดสอบอาจจะกระทำที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การดึงยางและวัดแรงที่ส่วนยืดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งยางขาด จะได้ข้อมูลที่บ่งบอกคุณภาพของยาง การทดสอบโดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ วิธีที่ใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลกับวิธีที่ใช้วิธีทดสอบวงแหวน ผลการทดสอบด้วยทั้ง 2 วิธีไม่จำเป็นต้องได้ค่าเท่ากัน โดยทั่วไป ชิ้นทดสอบรูปวงแหวนให้ค่าต่ำกว่า

### 1.2.6.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเป็นความต้านทานของยางวัลคาไนซ์ต่อการดึงให้ยางฉีกขาดตรงจุดที่อ่อนแอที่สุด ความสำคัญของการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดผลิตภัณฑ์ยางอาจจะเกิดการประลัยหรือล้มเหลวในระหว่างการใช้งานอันเนื่องมาจากการเกิดและการขยายตัวของรอยแตก ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการฉีกขาดจนกระทั่งไม่สามารถใช้งานต่อได้อีกการฉีกขาดมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นได้บริเวณที่มีการสะสมความเค้นโดยเฉพาะบริเวณที่มีรอยบากหรือรอยตำหนิต่าง ๆ ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด คือค่าแรงมากที่สุดต่อ 1 หน่วยความหนาที่ใช้ในการฉีกชิ้นตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร ความต้านทานต่อการฉีกขาดขึ้นอยู่กับระดับการเชื่อมโยงเป็นอย่างมาก ยางที่ได้รับการคงรูปที่อุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลาในการคงรูปน้อยจะมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ดังนั้นการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดนี้ นับว่าเป็นเรื่องสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการทดสอบผลิตภัณฑ์ยางเนื่องจากความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางอาจเกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น

1. ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบ
2. อัตราความเร็วในการดึง
3. ระดับของการตกผลึก
4. อุณหภูมิ
5. จุดอ่อน เช่น รอยฉีกขาดเดิมของยางเอง
6. ปริมาณและชนิดของสารตัวเติม

ความทนต่อการฉีกขาด ความทนการฉีกขาดของยางขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบและอัตราฉีก เป็นการวัดแรงที่ใช้ฉีกยางตัวอย่างที่มีรอยตำหนิ ตัด หรือคอดเป็นมุมให้เกิดผิวใหม่อย่างต่อเนื่องจนขาดจากกัน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด คือ ค่าแรงที่มากที่สุดต่อ 1 หน่วยความหนาที่ต้องใช้ในการฉีกชิ้นตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร

การทดสอบการฉีกขาดที่ใช้ตัวอย่างยางที่ทำมุม การทดสอบนี้เป็นการรวมกันระหว่างการทำยางเริ่มฉีกขาดและการขยายตัวของรอยฉีก ในขณะทดสอบที่ดึงยางอยู่นั้นมีความเครียดสะสมที่ตรงปลายมุม จนกระทั่งสูงพอที่จะเกิดรอยฉีกตรงปลายมุม และความเครียดดังกล่าวจะทำให้รอยฉีก

ขยายตัวออกไป แต่ในการวัดเราจะไม่สามารแยกแรงออกไปได้ว่าแรงใดทำหน้าที่ให้เกิดการฉีกและแรงใดทำให้รอยฉีกขยายตัว เพราะการเกิดทั้ง 2 อย่างนี้ ต่อเนื่องกันอย่างรวดเร็วมาก

### 1.2.6.3 สมบัติความแข็ง (Hardness Properties)

ความแข็งของยางหมายถึง ความต้านทานต่อการยุบตัวของยางเมื่อกดลงไป ถ้าหากใช้แรงกดที่เท่ากัน ยางที่อ่อนจะกดลงไปลึกกว่ายางที่แข็ง การวัดความแข็งแรงของยางจะวัดกับยางที่วัลคาไนซ์แล้วเท่านั้น

ขนาดและลักษณะของแรงที่กด แรงที่ใช้กดยาง มีอยู่ 2 วิธีการด้วยกัน คือ ใช้สปริงกดกับใช้น้ำหนักกดแรงที่มาจากสปริง จะไม่คงที่ ยิ่งสปริงกดลงไปมากเท่าใดแรงที่กระทำต่อยางมีมากเท่านั้น ส่วนแรงที่ใช้น้ำหนักกดจะคงที่ตลอด ดังนั้น ในมาตรฐานวัดความแข็งนานาชาติ (International Rubber Hardness Degree) จะใช้การกดด้วยแรงที่เป็นน้ำหนัก การใช้แรงที่กดมากจะทำให้ยางยุบตัวได้มาก ในกรณีที่ยางแข็งมาก ๆ ยางจะยุบตัวน้อยเมื่อถูกกด การวัดรอยยุบตัวจะทำได้ยาก ดังนั้นยางที่แข็งมาก ๆ ก็จะต้องทดสอบด้วยขนาดของแรงกดสูงตามไปด้วยมีฉะนั้น ยางที่จะเห็นการยุบตัว ในมาตรฐานสากล ISO ได้กำหนดวิธีการวัดความแข็งของยางออกเป็น 3 มาตรฐาน คือ ISO 48-1979 สำหรับยางแข็งปกติ ISO1400-1975 สำหรับยางนิ่ม และ ISO 1818-1975 สำหรับยางแข็งพิเศษ

รูปร่างและขนาดของตัวกด (indenter) รูปร่างของตัวกด มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือแบบกรวย (cone) กับ แบบลูกโลหะกลม ขนาดของตัวกดขึ้นอยู่กับความแข็งของยาง กรณีที่ยางแข็งมาก ๆ จะใช้ตัวกดขนาดเล็กเพื่อที่ใช้การยุบตัวเห็นได้ชัด ส่วนยางที่นิ่มมากจะกลับกัน จะใช้ตัวกลมที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีที่ใช้แรงกดน้อย ก็อาจจะใช้ตัวกดเล็กเพื่อที่จะให้เกิดการยุบตัวเห็นได้ชัดเช่นเดียวกัน

ความหนาของแผ่นยาง ระยะยุบตัวของการกดขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นยาง ถ้าแผ่นยางบางจนเกินไป แรงกดที่กระทำจะมีอิทธิพลไปจนถึงพื้นที่รับยางเอาไว้ จะทำให้ยางมีความแข็งมากกว่าเป็นจริง ดังนั้นในการวัดความแข็งแบบมาตรฐาน จะกำหนดให้ตัวอย่างยางหนา 8 ถึง 10 มิลลิเมตร แต่ถ้าตัวอย่างบางกว่านี้ จะต้องลดขนาดของเครื่องทดสอบยาง มีการไหลลงไปจึงจะทำให้อ่านค่าได้ถูกต้อง ดังเช่นในกรณีการทดสอบที่เรียกว่า micro-test จะลดขนาดของอุปกรณ์และน้ำหนักกดลงไปถึง 1 ถึง 6 ดังนั้นยางที่ใช้วัดกับเครื่องแบบ micro-test นี้สามารถมีความหนาได้ 1.6 – 2 มิลลิเมตรก็ยังสามารถวัดความแข็งถูกต้องเหมือนกับการวัดชิ้นใหญ่

### 1.2.6.4 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง (Abrasion resistant)

การสึกหรอหมายถึงการสูญเสียของวัสดุ ซึ่งเกิดขึ้นขณะนำผิวของวัสดุสองชิ้น มาขัดหรือถูซึ่งกันและกัน ฉะนั้นความสึกหรอของยางเกิดขึ้นเมื่อยางเคลื่อนไปสัมผัสกับวัตถุใดๆ ที่ทำให้ยางสึกหรอหรือหลุดออกโดยเป็นผงหรือแบบของแข็ง กรณีแบบผงได้แก่การสึกหรอเนื่องมาจากสิ่งสัมผัสกับยางเป็นผงของแข็ง เช่น การสึกหรอของท่อพ่นทราย การสึกหรอของยางบุเครื่องสูบลมและการสึกหรอของสายพานลำเลียง เป็นต้น ส่วนแบบของแข็งได้แก่การสึกหรอเนื่องมาจากสิ่งสัมผัสกับยางเป็นชิ้นของแข็ง เช่นการสึกหรอของยางรถกับพื้นคอนกรีต และการสึกหรอของพื้นรองเท้า เป็นต้น

ความเสียหายกับการสึก ความเสียหายเป็นสาเหตุหลักของการสึก การศึกษาการสึก (หรือการสึกหรอ) ของยางที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการวัดความเสียหายระหว่างยางกับผิวที่สัมผัส แต่การทดสอบการสึกหรออาจไม่เกี่ยวข้องกับการวัดความเสียหายเลยก็ได้ เพราะว่าการสึกหรอ หมายถึงการสูญเสียเนื้อของวัตถุเมื่อผิว 2 ผิวแตะและขัดถูกัน ดังนั้นการวัดการสึกหรอหรือความต้านทานต่อการสึกหรอของยางจึงเกี่ยวข้องโดยตรงกับการวัดสมรรถนะของผลิตภัณฑ์ยาง โดยทั่วไป คำว่า การขัดถู หรือ การสึกจากการขัดถู (Abrasion) กับ การสึก (Wear) เป็นคำที่ใช้ในความหมายเดียวกันการทดสอบเป็นวิธีวัดความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistant) ของยางปรากฏ การการสึกหรอของยางเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องกับปัจจัยและคุณสมบัติหลายประการของ ยาง พื้นผิวที่สัมผัสกับยาง ภาวะการเดินเครื่อง หรือสภาวะการเครื่องที่สัมผัส และสภาวะแวดล้อม ของการทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของยาง การสึกหรอของยางขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 ประการดังนี้

1. ยางตัวอย่าง ได้แก่ชนิดของยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ผสม ในยาง ลักษณะผิวของยางตัวอย่าง สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงเคมี และสมบัติเชิงความร้อนของยางตัวอย่าง เป็นต้น
2. ผิวที่สัมผัส ได้แก่ชนิดของวัตถุ ลักษณะผิว สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงเคมี และสมบัติเชิง ความร้อนของผิวสัมผัส
3. สภาวะของการเดินเครื่อง ได้แก่ ขนาดของแรงกด ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างผิว ระยะทางของการขัดถู ค่าของการขัดถู ความถี่ของการขัดถู และสภาวะการหล่อลื่นของผิวสัมผัสเป็น ต้น
4. สภาวะของการทดสอบ ได้แก่บรรยากาศของการทดสอบ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ชนิดปริมาณ ฝุ่นละออง ไอน้ำมัน หรือละอองของเหลวอื่นๆ เป็นต้น

#### 1.2.6.5 การทดสอบการเสียรูปเนื่องจากการกด (Compression set)

การทดสอบการเสียรูปเนื่องจากการกด หมายถึง การยุบตัวของยางหลังจากที่เอาแรงกด ออกแล้ว (30 นาที) การทดสอบการทดสอบการเสียรูปเนื่องจากการกดมีไว้เพื่อ วัดความสามารถของ ยางคอมปาวด์ ที่จะรักษาสมบัติยืดหยุ่นภายใต้ระยะเวลาการกดนาน ๆ การทดสอบโดยทั่วไป มักจะ กระทำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องและการทำการกดขยงลงไปในระยะ 25 % ของความหนาเดิม ระยะเวลาการทดสอบอาจจะเป็น 1 วัน จนถึง 7 วัน เป็นต้น ถ้าเกิดการยุบตัวมากจะแสดงออกมา รูปของการมี Compression Set สูง

ลักษณะการเกิด Compression Set เมื่อยางถูกกดไว้เป็นเวลานาน ๆ โมเลกุลของยางจะ เกิดการไหลไปตามการกดนั้น พันธะเชื่อมโยง (X - link) ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจะเป็นตัวที่ดึงยาง ให้คงรูปกลับมาเมื่อให้เอาแรงกดนั้นออกไป

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Compression Set มาก คือ พันธะการเชื่อมโยงในโมเลกุลของยาง

1. ถ้าหากพันธะการเชื่อมโยงมีน้อย ยางจะเกิดการไหลตัวในขณะที่ถูกกดจะให้ Compression Set สูง



2. ถ้ายางที่มีพันธะไม่เสถียร แปรเปลี่ยนได้ จะทำให้ค่า Compression Set สูง เช่น ยางที่วัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์จะทำให้ค่า Compression Set สูง

3. ยางที่มีสารตัวเติม ซึ่งอาจสามารถก่อพันธะบางอย่างกับโมเลกุลยางได้ จะให้ Compression Set สูง เนื่องจากการเกิดพันธะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกีดกันระหว่างการกีดกัน เช่น ยางที่มีสารตัวเติมเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กจะให้ค่า Compression Set สูงกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 1.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทัศนีย์ (2544) ได้ทำการศึกษาโดยการนำกระดาษหนังสือพิมพ์มาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในพลาสติกคอมโพสิต จากผลการทดลองพบว่าการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (MAPP) และการใช้กรดอะโลลิคกราฟต์พอลิโพรพิลีน (AAPP) ในปริมาณที่ไม่มากนัก จะช่วยปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้น โดยค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 57 MPa และค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง (Unnotched izod impact strength) เท่ากับ 212 J/mm<sup>2</sup>

Qiao และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้กระดาษที่ผ่านการล้างน้ำหมึกมาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในพอลิโพรพิลีน โดยทำการเปรียบเทียบสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Coupling agent) ชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ (MAPP), กรดสเตียริก (SA), และ ไททาเนท (NDZ-101) โดยได้ทำการศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง ลักษณะทางสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของคอมโพสิตที่เตรียมได้ จากการทดลองพบว่า พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ (MAPP) จะให้ผลของการยึดติดระหว่างกระดาษที่ผ่านการล้างน้ำหมึกและพอลิโพรพิลีนที่ดีที่สุด นอกจากนี้ความทนทานต่อแรงดึงและอัตราการตกผลึกของคอมโพสิตยังมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ส่งผลต่อการปรับปรุงความเสถียรต่อความร้อนด้วย

Nashar และคณะ (2004) ได้นำเศษกระดาษหนังสือพิมพ์กลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คอมโพสิต โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตกับแมกนีเซียมคลอไรด์ต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) จากการทดลองพบว่าการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ปริมาณ 40 phr ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวจะให้สมบัติทั้งเชิงกลและทางไฟฟ้าที่ดีกว่าการใช้กระดาษที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว

ปิยะพงษ์ (2548) ได้ทำการศึกษาการนำกระดาษหนังสือพิมพ์กลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นสารตัวเติมในยางคอมพาวด์ โดยได้ทำการศึกษาผลของน้ำหมึกในกระดาษหนังสือพิมพ์ต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และยางวัลคาไนซ์ โดยเลือกใช้เศษกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านและไม่ผ่านการล้างน้ำหมึกที่มีขนาด 50 เมช ในปริมาณ 10 phr พบว่าสมบัติของยางคอมพาวด์และยางวัลคาไนซ์ที่ได้ไม่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้เศษกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ไม่ผ่านการล้างน้ำหมึกมาศึกษาผลของขนาดและปริมาณเศษกระดาษหนังสือพิมพ์ ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณเศษกระดาษหนังสือพิมพ์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เวลาสก๊อช

และเวลาสุกของยางมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความหนืดมูนนี้ ค่าโมดูลัส ค่าความแข็ง และค่าการเสียรูปเนื่องจากการกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าขนาดของเศษกระดาษหนังสือพิมพ์ไม่ค่อยมีผลต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์มากนัก

กนกวรรณ (2549) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอโฟกไซต์ โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ 0 ถึง 40 phr พบว่าเมื่อปริมาณของกระดาษหนังสือพิมพ์เพิ่มขึ้น เวลาสุก กว้าง เวลาสุก ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดของยางมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความหนืดมูนนี้ ค่าโมดูลัส ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด ค่าความแข็ง ค่าการเสียรูปเนื่องจากการกด และค่าการดูดซึมน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติอโฟกไซต์จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของยางต่ำกว่ายางธรรมชาติและจะลดลงตามปริมาณหม้ออโฟกไซต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าการเสียรูปเนื่องจากการกดของยางธรรมชาติอโฟกไซต์จะดีกว่ายางธรรมชาติ

สมหมาย และคณะ (2550) ได้พัฒนาวัตถุดิบชนิดใหม่เพื่อใช้ผลิตเป็นหนังเทียมที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี โดยได้นำยางธรรมชาติมาทำการผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิโอฟีน โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ 70:30, 60:40, และ 50:50 ทำการผสมโดยใช้เครื่อง Two Roll Mill และขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Calender เพื่อรีดออกมาเป็นแผ่นบาง ให้มีความหนาประมาณ 2.5 มิลลิเมตร จากนั้นก็นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำการทดสอบ ค่าการทนแรงดึง ค่าการทนทานต่อการฉีกขาด ค่าความหนาแน่น แล้วนำมาเปรียบเทียบสมบัติกับพลาสติกพีวีซี และเทอร์โมพลาสติกพอลิโอฟีนที่ไม่ได้ผสมยางธรรมชาติพบว่าผลิตภัณฑ์จากวัสดุทดแทนพีวีซีที่เตรียมมีความเหมาะสมสามารถใช้งานได้ การศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานจากวัสดุทดแทนพีวีซี พบว่าการเติมสารเติมแต่งที่มีความหนาแน่นสูงกว่าพลาสติกได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่จะเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงาน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาการปรับกระบวนการในการขึ้นรูปให้มีความเหมาะสม

ลำภา และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาการผลิตหนังเทียมจากยางพาราและเส้นใยเปลือกทุเรียน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของหนังเทียมที่ได้โดยทำการหั่นเปลือกทุเรียนให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร ตากให้แห้งทำการต้มเพื่อศึกษาลักษณะเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง แล้วฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 20-25 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง จากนั้นนำเยื่อที่ได้ผสมกับน้ำยางชั้น 60% ในอัตราส่วนเส้นใยเปลือกทุเรียนแห้ง 40 กรัม น้ำ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำยางชั้น 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร หยดด้วยกรดซัลฟิวริก เทใส่ผ้าขาวบางแล้วรีดให้บาง เมื่อนำไปทดสอบพบว่ามีความเหมาะสมในการคั่นตัว เมื่อพับแล้วไม่มีรอยยับ คั่นตัวได้ดี ไม่เปื่อยยุ่ยเมื่อสัมผัสกับน้ำ เมื่อบางไว้อุณหภูมิห้องไม่ขึ้นรา มีความยืดหยุ่นดี กั้นน้ำได้ทนทาน และหนังเทียมจากยางพาราผสมเส้นใยเปลือกทุเรียนที่ได้จะมีผิวสากเมื่อสัมผัสเนื่องจากเส้นใยพืชคล้ายหนังกลับที่ใช้ทำรองเท้า

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อประยุกต์ใช้งานในรูปของกระดาษหนังเทียม
2. เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ
4. ศึกษาประสิทธิภาพของคอมโพสิตที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า

#### 1.5 ขอบเขตของโครงการ

1. เตรียมเส้นใยกระดาษที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ 20 และ 40 เมช เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยทำการแปรปริมาณการใช้ที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr
2. เตรียมเส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์ เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว
3. ศึกษาผลปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่แตกต่างกันได้แก่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณการใช้ 0, 4, 8, และ 12 phr

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายผลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้งานในรูปของกระดาษหนังเทียมได้
2. สามารถอธิบายผลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ
3. สามารถอธิบายผลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ
4. สามารถอธิบายประสิทธิภาพของคอมโพสิตที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้าได้

## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 ยางและสารเคมี

1. **ยางธรรมชาติ** ใช้ยางแท่ง STR 5L ผลิตโดย องค์การสวนยาง (นาบอน) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
2. **ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR)** ผลิตโดย บริษัทเมืองใหม่ กัททรี จำกัด (มหาชน) เป็นยางแท่งมีลักษณะเป็นก้อนสีเหลืองอ่อน
3. **กระดาษ (Paper)** เป็นเศษกระดาษที่เหลือใช้จากสำนักงานที่ผ่านการปั่นด้วยเครื่องปั่นจมนี ขนาดเล็ก จากนั้นนำมาผ่านเตาอบที่อุณหภูมิ 20 เมชและ 40 เมช ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติม
4. **ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)** ลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดย บริษัท ยูนิไทย จำกัด ใช้เป็นสารกระตุ้นร่วมกับกรดสเตียริกในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน
5. **กรดสเตียริก (Stearic acid)** ลักษณะเป็นเกล็ดสีน้ำตาลอ่อน ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท อินพีเรียล เคมีคัล จำกัด ใช้เป็นสารกระตุ้นร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ด้วยกำมะถัน
6. **Butylated hydroxytoluene (BHT)** มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพในยางธรรมชาติ
7. **N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulfenamide (TBBS)** มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีขาว ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม เป็นสารเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง
8. **กำมะถัน (Sulphur)** ลักษณะเป็นผงสีเหลือง ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตโดยบริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์
9. **โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate)** ลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีขาวใส ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารปรับสภาพผิว
10. **แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium Chloride)** ลักษณะเป็นของเหลวสีขุ่น ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารปรับสภาพ

#### 2.2 อุปกรณ์

1. **เครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill)** เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว สามารถผสมยางได้ในปริมาณ 6.6 ปอนด์ อัตราความเร็วของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1/1.35 ผลิตโดย หจก.ชัยเจริญการช่าง
2. **เครื่องทดสอบการคงรูปของยาง (Oscillating Disc Rheometer, ODR)** ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น TECH OD+ ใช้ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์

3. เครื่องอัดไฮโดรลิก (Compression moulding) ใช้อัดเข้าซึ่งมีส่วนประกอบ คือ มีชุดควบคุม ความร้อนที่ใช้ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ 3 ชุด อุณหภูมิสูงสุดของเครื่องเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีแรงอัดสูงสุดเท่ากับ  $350 \text{ kg/cm}^3$  ผลิตโดยบริษัทชัยเจริญการช่างประเทศไทย จำกัด

4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) เป็นเครื่องยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H10 KS ผลิตโดย บริษัท Hounsfield test equipment ประเทศอังกฤษเป็นเครื่องที่ใช้วัดแรงกดหรือแรงดึง สามารถรับแรงได้สูงสุด 10 KN มี load cell ทำหน้าที่ แปลงสัญญาณจากค่าแรงที่ได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นค่าแรงดึงหรือกดในหน่วยนิวตัน สามารถตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

5. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistant) ใช้ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์

6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใช้ในการชั่งน้ำหนักของยางและสารเคมี รุ่น PB 3002-3 พิกัดกำลังชั่งสูงสุด 3,100 กรัม ผลิตโดยบริษัท Mettler toledo (Thailand) จำกัด รุ่น METTLER AJ 150 ผลิตโดยบริษัท Diethelm co.,ltd. เป็นเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง มีพิกัดกำลังชั่งสูงสุด 150 กรัม

7. ตู้อบความร้อน (oven) ยี่ห้อ BINDEN ใช้ระบบอากาศร้อนหมุนเวียน ควบคุมอุณหภูมิที่  $70-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะใช้ความร้อนของตู้อบขึ้นทดสอบผลิตโดยบริษัท memmert gnbh ประเทศเยอรมัน

8. ชุดทดสอบความสามารถในการผิดรูปถาวรหลังการกด (compression set) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมประกบกันด้วยแผ่นเหล็กแบนโดยทั่วไปจะให้โลหะกันระยะหนา เท่ากับ  $9.38 \pm 0.01$  มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 25 % ของความหนาของยาง

9. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) ใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์โดยอาศัยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 0.8-200 mm. หรือรังสีที่มีเลขคลื่น  $12500-50 \text{ cm}^{-1}$

10. เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester) ใช้ทดสอบสมบัติความแข็งของยางเป็นเครื่องทดสอบชนิด Shore A ผลิตโดยบริษัท Rex Gauge CO.,Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา

11. เครื่องตัดชิ้นทดสอบ (Pneumatic cutting machine) เป็นเครื่องที่ใช้ตัดชิ้นทดสอบแบบแรงดันลม

12. เครื่องวัดความหนา (Thickness) ใช้วัดความหนาขึ้นตัวอย่าง อ่านค่าความหนานบนหน้าปัดของเครื่องมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

13. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ HITACHI กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron ที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมี

กำลังขยายที่ 3000 จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถ แจกแจงรายละเอียดของภาพได้ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100nm จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

14. เครื่องกวนสารเชิงกล (Mechanical stirrer) เป็นเครื่องที่ใช้กวนสารเคมี ความเร็วรอบคงที่ ผลิตโดยบริษัท IKA. CO., LTD จัดจำหน่ายโดย หจก.ยู.พี มาร์เก็ตติ้ง เยเนอรัลซัพพลาย

## 2.3 วิธีการดำเนินวิจัย

### 2.3.1 การเตรียมและคัดขนาดกระดาษ

นำกระดาษเหลือใช้จากสำนักงานมาฉีกเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นใช้กรรไกรตัดให้ได้ขนาด ประมาณ 2-3 นิ้ว แล้วนำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น เสร็จแล้วจึงนำไปร่อนกำหนดขนาดด้วย ตะแกรงขนาด 20 และ 40 เมช แล้วนำเยื่อกระดาษที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 2.3.2 อิทธิพลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เพื่อประยุกต์ใช้งานในรูปของกระดาษหนังเทียม

นำเส้นใยกระดาษที่เตรียมมาบดผสมลงในสูตรยาง โดยการแปรปริมาณที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr และใช้สูตรในการทดลอง ตามตารางที่ 2.1 แล้วนำมาบดผสมด้วยเครื่องผสมยางสอง ลูกกลิ้งโดยลำดับขั้นตอนการผสมเป็นดังข้อมูลในตารางที่ 2.2 หลังจากนั้นจึงนำยางที่รีดออกมาเป็น แผ่นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 12 ชั่วโมงแล้วจึงนำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบ สมบัติการวัลคาไนซ์ แล้วจึงนำไปอัดเข้าตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ทำได้ และนำไปทดสอบสมบัติ ความทนทานต่อแรงดึง (ASTM D412) ความทนทานต่อการฉีกขาด (ASTM D624-00) การเสียรูป เนื่องจากความร้อน (ASTM D946) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (ASTM D3389-85) และความแข็ง (ASTM D2240) ของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้

### ตารางที่ 2.1 สูตรยางที่ใช้ในการเตรียมกระดาษหนังเทียม

สารเคมี	ปริมาณ phr
STR 5L	100
ZnO	5
Stearic acid	1
BHT	1
TBBS	1
Sulphur	2.5
Paper fiber	0, 10, 20, 30 และ 40 phr

ตารางที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี

ลำดับการใส่สารเคมี	ส่วนผสม	เวลาผสม (นาที)
1	STR 5L	2
2	Stearic acid	1
3	ZnO+Paper fiber	10
4	Antioxidant	1
5	Accelerator	1
6	Sulphur	2

### 2.3.3 อิทธิพลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ

นำเส้นใยกระดาษที่เตรียมมาทำการกวนกับ 20% Sodium Silicate ปริมาณ 50 กรัม ที่ระยะเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจึงเติม 20% Magnesium Chloride ปริมาณ 50 กรัม กวนต่อเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงทำการกรองด้วยตะแกรงและอบให้แห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์สมบัติ FTIR และจึงนำเส้นใยกระดาษที่เตรียมได้ไปเติมลงในยางเพื่อทำการบดผสมตามสูตรข้างต้นตารางที่ 2.1 โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษแห้งเทียบที่เตรียมได้กับการใช้กระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว โดยการนำยางที่เตรียมได้ไปอัดเข้าเพื่อนำไปทดสอบสมบัติ ดังหัวข้อที่ 2.3.2

### 2.3.4 อิทธิพลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ

การศึกษาปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะทำการเลือกใช้ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับได้แก่ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการใช้จะทำการศึกษาที่ 0, 4, 8, 12 phr โดยสูตรที่ใช้ในการเตรียมและลำดับขั้นตอนการผสมแสดงดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำยางที่เตรียมได้ไปอัดเข้าเพื่อนำไปทดสอบสมบัติ ดังหัวข้อที่ 2.3.2

## 2.4 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง

### 2.4.1 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Properties) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบล (Type C) นำไปวัดความหนา แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปจับยึดด้วยหัวจับทั้งสองด้าน ทำการดึงชิ้นตัวอย่างโดยใช้อัตราความเร็ว $500 \pm 50$ มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง วัดค่า 100% และ 300% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณตามสูตรต่อไปนี้

$$100\% \text{ Modulus} = F/A \dots \dots \dots (2.1)$$

โดย F คือ แรงที่ใช้ดึงขึ้นทดสอบจนขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง (mm)<sup>2</sup>

$$300\% \text{ Modulus} = F/A \dots\dots\dots(2.2)$$

โดย F คือ แรงที่ใช้ดึงชิ้นทดสอบจนขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง (mm)<sup>2</sup>

$$T.S. \text{ (MPa)} = F/A \dots\dots\dots(2.3)$$

โดย F คือ แรงที่ใช้ดึงชิ้นทดสอบจนขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง (mm)<sup>2</sup>

$$E.B. \text{ (%) } = [(L_u - L_o)/L_o] \times 100 \dots\dots\dots(2.4)$$

โดย E.B. คือ ความสามารถในการยืดจนขาด (%)

$L_u$  คือ ส่วนยืดเมื่อขยายขาด (mm)

$L_o$  คือ ความยาวระหว่างขีดเดิม (mm)

**2.4.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Properties)** ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 ตัดชิ้นตัวอย่างแบบมุมฉาก (Die C) นำไปวัดความหนา แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปจับยึดด้วยหัวจับทั้งสองด้าน ทำการดึงชิ้นตัวอย่างโดยใช้อัตราความเร็ว 500±50 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง วัดค่าแรงที่ใช้และนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณแสดงดัง สมการที่ 2.5

$$T \text{ (N/mm)} = F_s/D \dots\dots\dots(2.5)$$

โดย  $F_s$  คือ แรงที่ใช้ดึงสูงสุดหรือค่ากลางของแรงดึงขาด (N)

D คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

**2.4.3 ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistant)** ทำการทดสอบการสึกหรอแบบ taber โดยตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 114 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 6 มิลลิเมตร ไว้ตรงกลางตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างให้ได้ค่าที่แน่นอน ถึงมิลลิกรัม แล้วนำตัวอย่างมายึดติดไว้กับแกนจานหมุน ใช้ลูกกลิ้งล้อเบอร์ H18 แล้วปล่อยให้ล้อสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นทดสอบ ปรับให้ปลายท่อดูดให้อยู่ห่างจากผิวหน้าชิ้นทดสอบประมาณ 1.0 - 1.5 มิลลิเมตร แล้วตั้งให้ดูดได้ร้อยละ 70 ตั้งเครื่องทดสอบให้เดิน 1000 รอบ เมื่อเดินเครื่องครบ 1000 รอบ แล้วนำตัวอย่างทดสอบไปชั่งน้ำหนักที่หายไป ให้เดินอีก 1000 รอบและวัดน้ำหนักที่หายไปอีกครั้งและนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณแสดงดัง สมการที่ 2.6

ผลการทดสอบค่า Abrasion Loss จากเครื่อง taber ตามมาตรฐาน ASTM D 3389-85 ได้กำหนดให้รายงานผลเป็นน้ำหนักที่หายไป (มิลลิกรัม) ต่อการหมุน 1000 รอบโดยใช้สูตร

$$\text{Abrasion Loss, DM} = (m_o - m_1)/n \times 1000 \text{ กรัม/รอบ} \dots\dots\dots(2.6)$$



โดยที่  $m_0$  คือ น้ำหนักตัวอย่างทดสอบเริ่มต้น, กรัม

$m_1$  คือ น้ำหนักตัวอย่างทดสอบหลังการหมุน, กรัม

$n$  คือ จำนวนรอบที่หมุน

**2.4.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Tester)** ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ใช้เครื่องวัดความแข็งกดลงบนชิ้นทดสอบโดยทำการวัด 3 ตำแหน่ง อ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดของเครื่อง แล้วหาค่ากลาง ค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็น Shore A Yangที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาประมาณ 8-10 มิลลิเมตร ความกว้างไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร การวัดจะต้องกดให้แป้นสัมผัสกับหน้ายางโดยตลอด

**2.4.5 การทดสอบการเสียรูปเนื่องจากการกด (Compression Set)** ทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM D946) ตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นแท่งกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง  $29.0 \pm 0.5$  มิลลิเมตร หนา  $12.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร เตรียมโดยการอัดเข้าหรือการตัดและวัดความหนาของชิ้นทดสอบ นำตัวอย่างดังกล่าวมาวางไว้ในแผ่นโลหะ เอาโลหะกั้นมาวัดความหนา (โดยทั่วไปจะให้โลหะกั้นระยะหนา เท่ากับ  $9.38 \pm 0.01$  มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 25 % ของความหนาของยาง) มาวางกั้นกลางระหว่างแผ่นโลหะไว้ค้อย ๆ ชั้นสกรูลงไปพร้อม ๆ กัน ทุกด้านจนกระทั่งแผ่นโลหะสัมผัสกับโลหะกั้นระยะ ต้องตรวจสอบดูด้วยว่า อย่าให้ด้านข้างของตัวอย่างสัมผัสกับแผ่นโลหะกั้นระยะนั้น เมื่อชั้นสกรูได้ที่แล้วนำไปใส่เตาอบที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ถอดสกรูออก แล้วนำตัวอย่างวางไว้บนแผ่นไม้ เป็นเวลา 30 นาที แล้วค่อยวัดความหนา (ถ้าพบว่า ตัวอย่างใดมีฟองอากาศ ก็ให้ทิ้งตัวอย่างนั้น) และนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณแสดงดัง สมการที่ 3.7

$$\text{ความสามารถในการคืนตัวหลังการกด (\%)} = \frac{t_0 - t_1}{t_0 - t_5} \times 100 \dots \dots \dots (2.7)$$

โดยที่  $t_0$  คือ ความหนาก่อนการกด (mm)

$t_1$  คือ ความหนาหลังการกด (mm)

$t_5$  คือ ระยะห่างของแรงกด 25 %

## บทที่ 3

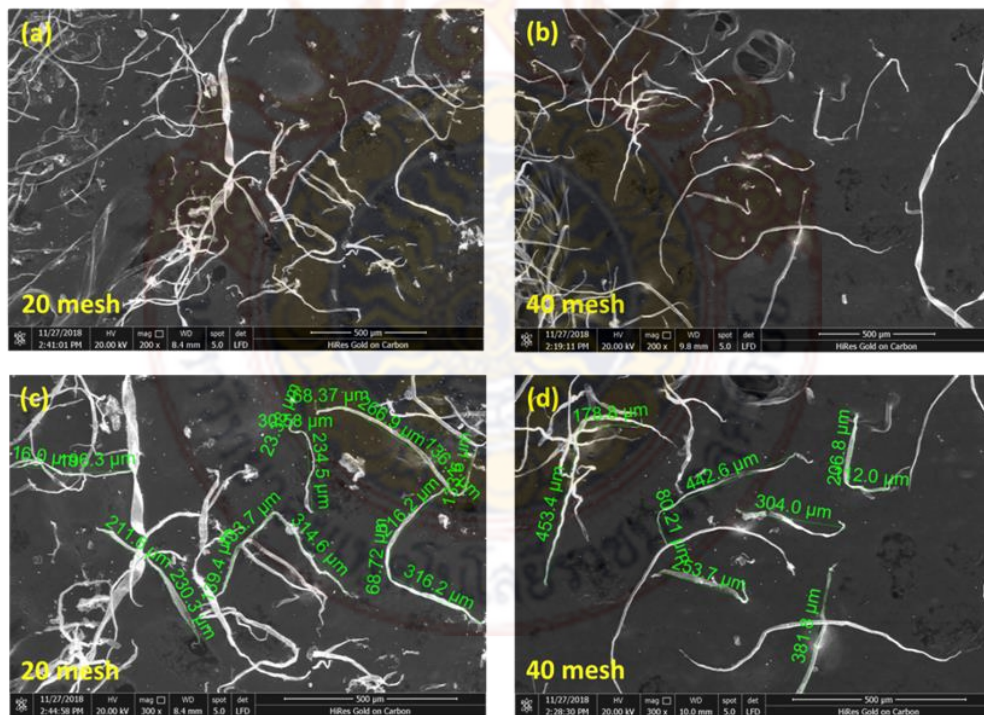
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 3.1 อิทธิพลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

จากการทดลองอิทธิพลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ในหัวข้อที่ 2.3.2 เพื่อประยุกต์ใช้งานในรูปของกระดาษหนังเทียมโดยการแปรปริมาณที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr โดยแปรขนาด 20 และ 40 เมช ได้ผลการทดลองดังนี้

##### 3.1.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใยกระดาษ

ในการเตรียมเส้นใยกระดาษและกำหนดขนาดด้วยตะแกรงกรองขนาดที่แตกต่างกัน 2 ขนาด คือขนาด 20 เมช (0.85 มิลลิเมตร) และขนาด 40 เมช (0.42 มิลลิเมตร) ซึ่งผลที่ได้จากการเตรียมเส้นใยกระดาษสามารถดูลักษณะและขนาดของเส้นใยจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยการถ่ายภาพจากเครื่อง SEM ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาจากเครื่อง SEM ของเส้นใยกระดาษที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงขนาด 20 และ 40 เมช

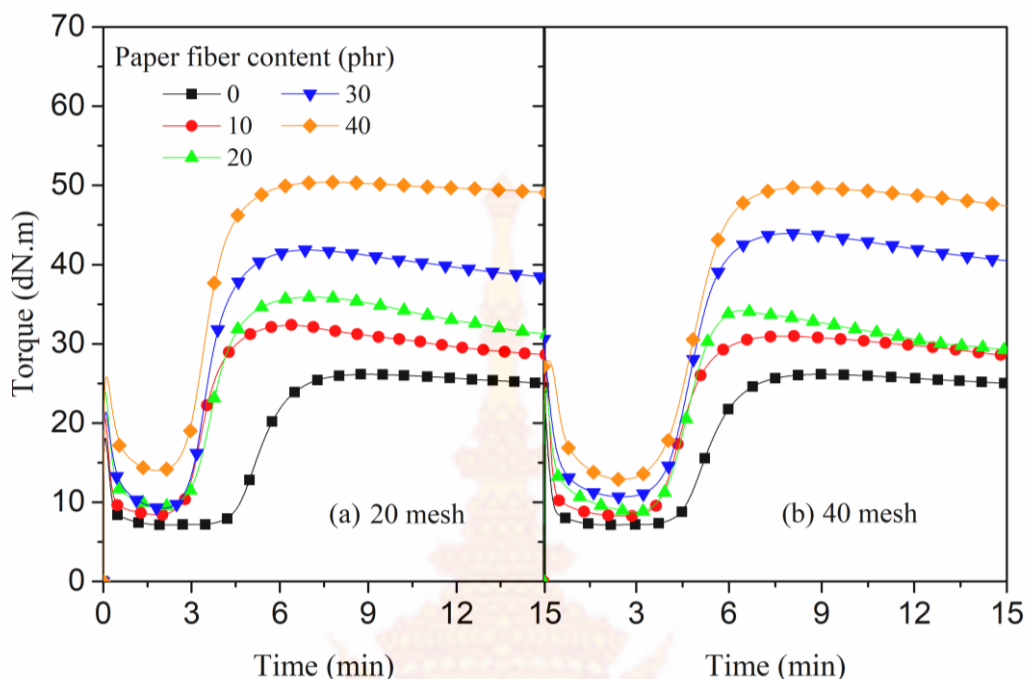
จากภาพที่ 3.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยกระดาษทั้ง 20 เมช (ภาพ a, c) และ 40 เมช (ภาพ b, d) ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือเส้นใยกระดาษที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงที่แตกต่างกันทั้งสองขนาดจะมีลักษณะเป็นทั้งเส้นใยกระดาษสั้นและเส้นใยยาวผสมกันไป ถึงแม้ว่ากรณีของตะแกรงขนาด 40 เมช จะมีขนาดของช่องตะแกรงที่เล็กกว่าขนาด 20 เมช ซึ่งปกติมีผลทำให้เส้นใยขนาดใหญ่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงไปได้ อย่างไรก็ตามเส้นใยสั้นหรือเส้นใยขนาดเล็กก็สามารถผ่านไปได้ทั้งตะแกรงขนาด 20 และ 40 เมช ดังนั้นจึงทำให้มีทั้งเส้นใยสั้นและเส้นใยยาวในตะแกรงทั้งสองขนาดแต่เส้นใยขนาดใหญ่หรือเส้นใยยาวอาจมีมากกว่าในกรณีการใช้ตะแกรงกรองขนาด 20 เมช ซึ่งไม่สามารถแยกแยะได้โดยใช้ถ่ายภาพ SEM

### 3.1.2 สมบัติวัลคาไนซ์

จากการทดสอบสมบัติวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่แปรขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ในหัวข้อที่ 2.3.2 ด้วยเครื่องทดสอบ ODR ที่อุณหภูมิ 160 °C ได้เวลาวัลคาไนซ์ ดังตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.2

**ตารางที่ 3.1** สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ขนาด 20 เมช และ 40 เมช ในปริมาณต่าง ๆ

Paper fiber content (phr)	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
20 mesh					
0	4.28	6.64	7.14	26.16	19.01
10	2.58	4.53	8.43	32.39	23.96
20	2.74	4.88	9.54	35.91	26.37
30	2.60	4.76	9.21	41.87	32.66
40	2.48	4.70	13.97	50.42	36.45
40 mesh					
0	4.28	6.64	7.14	26.16	19.01
10	3.35	5.64	8.25	30.98	23.73
20	3.63	5.49	8.74	34.21	25.46
30	3.51	5.91	10.68	43.94	33.26
40	3.32	6.05	12.87	49.74	36.87



ภาพที่ 3.2 ลักษณะการวัดค่าโมเมนต์ของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ ปริมาณการเติมเส้นใยกระดาษที่ 20 เมชและ 40 เมช

จากภาพที่ 3.2 พบว่า ลักษณะการวัดค่าโมเมนต์ของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่เตรียมทั้ง 20 เมช และ 40 เมช แสดงพฤติกรรมการณ์การวัดค่าโมเมนต์ของยางที่ไม่แตกต่างกัน นั่นคือ ค่าทอร์กของยางวัดค่าโมเมนต์ทั้งในกรณีของค่าทอร์กต่ำสุด ( $M_L$ ) และค่าทอร์กสูงสุด ( $M_H$ ) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยกระดาษที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยกระดาษซึ่งปกติจะมีความแข็งมากกว่ายาง การเพิ่มปริมาณของเส้นใยกระดาษจึงเป็นการเพิ่มสัดส่วนของของแข็งลงไป ในยางทำให้ความเหนียวของยางเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการเพิ่มปริมาณของเส้นใยกระดาษจะมีผลทำให้การเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยางและเส้นใยกระดาษมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในยางวัดค่าโมเมนต์เพิ่มขึ้นได้ด้วย ซึ่งค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงจะสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุด ( $M_H - M_L$ ) ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะสัมพันธ์กับระดับการวัดค่าโมเมนต์หรือระดับการเกิดพันธะเชื่อมโยงที่สามารถบ่งบอกได้ถึงระดับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางวัดค่าโมเมนต์ได้อีกทาง (Aroyo *et al.*, 2007, Salaeh and Nakason, 2012) นอกจากนี้จากค่าเวลาการสกอซ ( $t_{s1}$ ) และเวลาการวัดค่าโมเมนต์ ( $t_{c90}$ ) ในตารางที่ 3.1 พบว่าเวลาการสกอซและเวลาการวัดค่าโมเมนต์ของกระดาษหนึ่งเทียมที่เติมเส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช มีค่าที่สูงกว่าการเติมเส้นใยกระดาษขนาด 20 เมช ทั้งนี้อาจเกิดจากธรรมชาติของเส้นใยกระดาษที่มีความเป็นขี้ผึ้งมากกว่ายางธรรมชาติ จึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับของสารวัดค่าโมเมนต์บนเส้นใยกระดาษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตัวเร่งที่มีความเป็นขี้ผึ้งสูง สามารถเกิดการดูดซับได้ง่ายระหว่างกระบวนการวัดค่าโมเมนต์ โดยเส้นใยขนาด 40 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า แต่มีพื้นที่ผิวสัมผัสเยอะกว่า ทำให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งที่เติมลงไปได้มากกว่า ดังนั้นระยะเวลาการสกอซและเวลาการวัดค่าโมเมนต์ของยางที่เติมเส้นใยขนาด 40 เมช จึงยาวกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เส้นใยขนาด 20 เมช

### 3.1.3 สมบัติเชิงกล

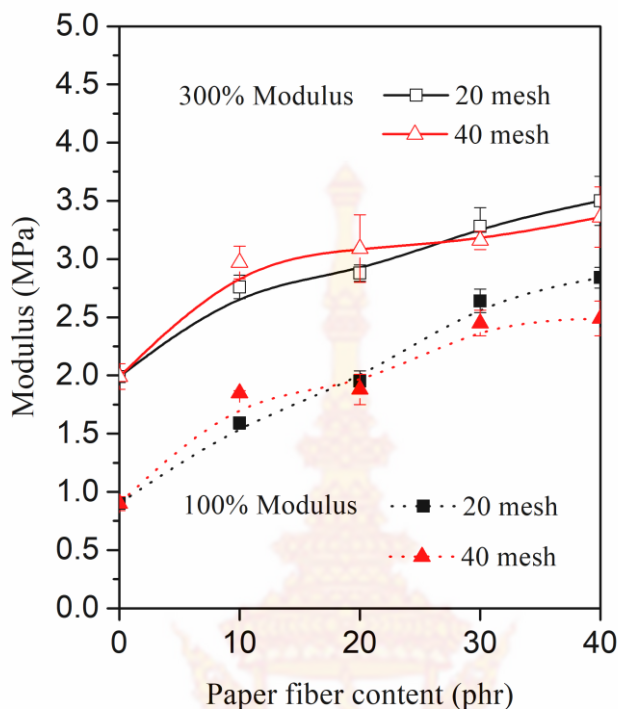
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่แปรขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ได้แก่ 100% และ 300% โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดจนขาด ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอและการคืนตัวหลังการกด แสดงค่าตามตารางที่ 3.2 – 3.3 แสดงดังภาพที่ 3.3 – 3.7

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงกลของกระดาษหนึ่งที่ย้อมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ

Paper fiber size (mesh)	Paper fiber content (phr)	100% modulus (MPa)	300% modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
20	0	0.9±0.06	1.99±0.11	21.38±3.96	796±45
	10	1.59±0.05	2.76±0.10	10.1±2.64	592 ±38
	20	1.95±0.09	2.88±0.07	6.12±1.38	488±38
	30	2.64±0.1	3.28±0.16	5.38±1.73	440±66
	40	2.84±0.09	3.50±0.21	4.15±0.72	384±40
40	10	1.85±0.02	2.97±0.14	14.25±1.71	644±45
	20	1.88±0.13	3.09±0.29	11.17±1.30	608±17
	30	2.45±0.11	3.16±0.08	5.72±1.84	548±43
	40	2.49±0.15	3.36±0.26	5.03±0.50	472±26

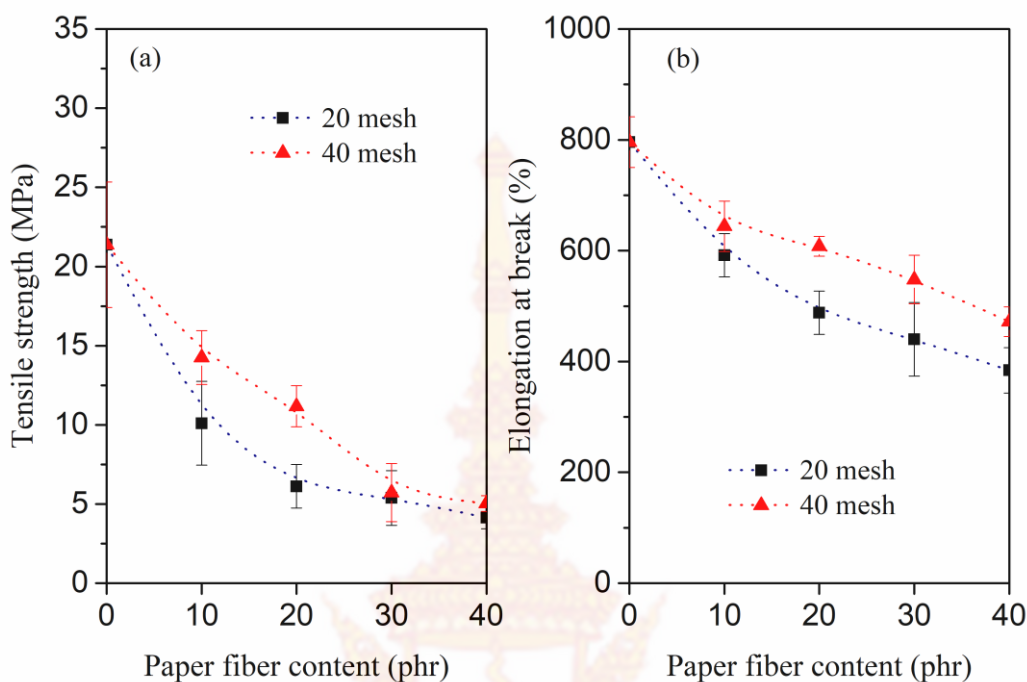
ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงกลของกระดาษหนึ่งที่ย้อมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ (ต่อ)

Paper fiber size (mesh)	Paper fiber content (phr)	Tear strength (N/mm)	Abrasion loss (mg/cycle)	Compression set (%)	Hardness (Shore A)
20	0	37.34±2.84	0.11±0.03	87.51±1.87	41.2±2.3
	10	39.65±2.84	0.14±0.01	98.85±1.99	55.9±3.6
	20	38.63±3.37	0.33±0.02	98.89±1.92	65.5±2.1
	30	37.73±4.44	0.69±0.06	101.08±1.86	71.0±0.0
	40	30.85±11.37	0.75±0.01	101.08±1.86	74.7±2.5
40	10	38.23±1.57	0.48±0.08	88.74±2.19	51.0±3.8
	20	35.50±2.20	0.53±0.03	98.85±1.99	73.2±3.1
	30	39.68±3.26	0.56±0.02	103.37±0.07	74.0±0.0
	40	32.85±5.93	0.64±0.03	103.30±0.06	79.4±2.4



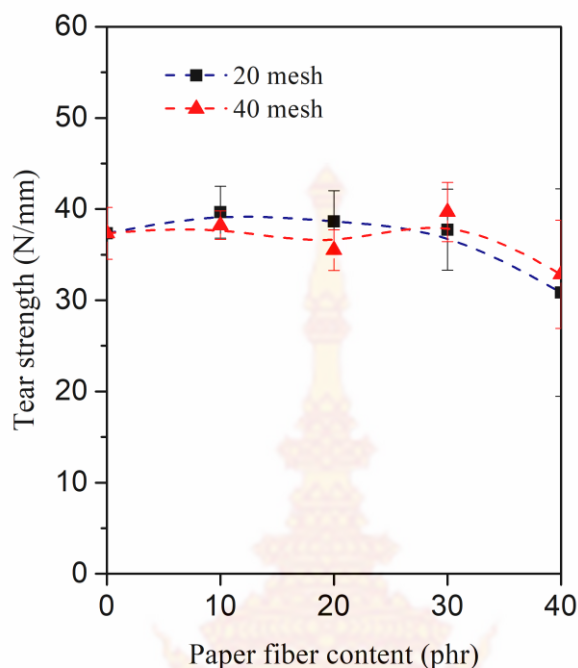
ภาพที่ 3.3 ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300 % โมดูลัส ของกระดาษหนัวย้อมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ

จากตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.3 แสดงผลค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% พบว่าค่าโมดูลัสของยางจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยกระดาษเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะเส้นใยกระดาษซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่ายางซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงที่ส่งผ่านมาจากยางธรรมชาติเมื่อเกิดการดึงยืด ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการยืด จึงทำให้ค่าโมดูลัสสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาระหว่างขนาดของเส้นใยกระดาษพบว่าเส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช จะให้ค่าโมดูลัสสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาด 20 เมช อย่างไรก็ตามที่ระดับการเติมเส้นใยกระดาษสูงกว่า 20 phr ค่าโมดูลัสของการเติมเส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นต่ำกว่า ขนาด 20 เมช ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อปริมาณเพิ่มสูงขึ้น เส้นใยขนาดเล็กจะมีโอกาสม้วนและจับกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ ดังนั้นการส่งแรงระหว่างเส้นใยกระดาษไปสู่ยางจึงอาจลดต่ำลง



ภาพที่ 3.4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของกระดาษหนึ่งที่ย้อมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ

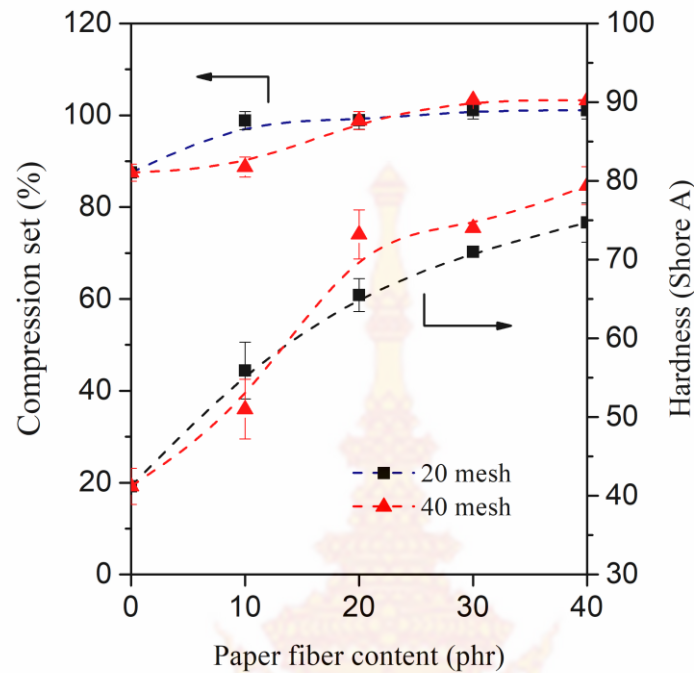
จากภาพที่ 3.4 (a) และ 3.4 (b) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาด ของกระดาษหนึ่งที่ย้อมที่ใช้เส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช ให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษหนึ่งที่ย้อมที่ใช้เส้นใยกระดาษขนาด 20 เมช ที่ปริมาณการเติมเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยกระดาษขนาด 20 เมช ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และมีเส้นใยยาวปะปนอยู่มากกว่าเส้นใยขนาดเล็ก จึงมีโอกาสทำให้เส้นใยเกิดการจับตัวกันในลักษณะการรวมตัวกันเองของเส้นใยกระดาษเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายกว่า เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยเซลลูโลสในโครงสร้างโมเลกุลของกระดาษด้วยตัวเอง ดังนั้นจึงทำให้เส้นใยที่ยาวกว่ากระจายตัวในยางได้ต่ำกว่า ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของกระดาษหนึ่งที่ย้อมที่เตรียมได้จึงมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้เส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช อย่างไรก็ตามกระดาษหนึ่งที่ย้อมทั้งสองชนิดที่เติมเส้นใยขนาดแตกต่างกันจะแสดงแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่เหมือนกัน นั่นคือทั้งค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยกระดาษสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้นอาจจะไปขัดขวางการตกผลึกของยางธรรมชาติ ทำให้ระยะยืดและแรงที่ใช้ดึงยืดจนขาดลดลง นอกจากนี้การเติมเส้นใยลงไปในยางทำให้เกิดพื้นที่อ่อนแอในยาง (Weak sites) การส่งผ่านแรงจึงเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการดึงยืดจนขาดจึงลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น (De et al., 2004)



ภาพที่ 3.5 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ

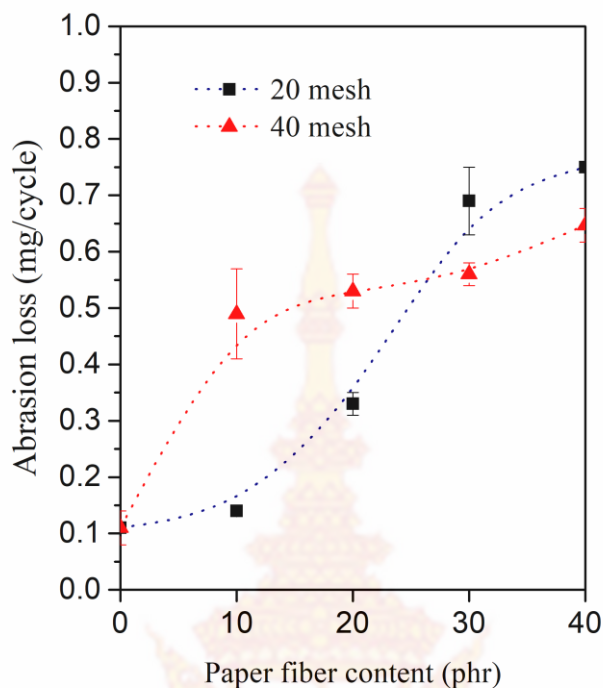
ภาพที่ 3.5 พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนึ่งเทียมที่เติมเส้นใยกระดาษทั้งสองขนาดแสดงแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนกับขนาดของเส้นใย ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มกระดาษลงไปเพิ่มสูงขึ้น โดยกระดาษหนึ่งเทียมที่ประกอบด้วยเส้นใยขนาด 20 เมช ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า จะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช ที่ปริมาณการเติมเส้นใยกระดาษน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 phr ทั้งนี้เป็นเพราะเส้นใยที่เติมลงไปในยางในยางทำให้เกิดการขัดขวาง (Hinderance) แรงที่ใช้ในการฉีกขาด การขยายตัวของรอยฉีกขาดจึงเกิดได้ยากขึ้น (Ismail et al., 1997) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของเส้นใยกระดาษเพิ่มสูงขึ้น การจับกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยกระดาษเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ก่อให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอในชิ้นตัวอย่าง ความแข็งแรงของชิ้นตัวอย่างจึงลดต่ำลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนึ่งเทียมมีค่าลดต่ำลงด้วย





ภาพที่ 3.6 ค่าการบิดรูปเนื่องจากการกดและค่าความแข็งของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ

จากภาพที่ 3.6 พบว่าค่าการบิดรูปเนื่องจากการกดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรยางที่ไม่เติมเส้นใยกระดาษ (0 p/hr) โดยค่าที่ต่ำของสูตรยางที่ไม่เติมเส้นใยกระดาษหมายถึงยางมีการบิดรูปน้อย สามารถคืนรูปได้ดีหลังจากการกด ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการทดลอง เมื่อยางถูกกดไว้เป็นระยะเวลาสั้น ๆ โมเลกุลของยางจะไหลไปตามแรงกดนั้น พันธะการเชื่อมโยงที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจะเป็นตัวที่ดึงยางให้คืนรูปกลับมาได้เมื่อเอาแรงนั้นออกไป ส่วนการมีสัดส่วนของเส้นใยกระดาษจะทำให้ค่าความสามารถในการบิดรูปที่สูงขึ้น เนื่องจากการมีสัดส่วนของเส้นใยกระดาษโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณสูง ๆ จะทำให้ยางมีสมบัติความเป็นอีลาสติก (Elastic) ลดลง เพราะเส้นใยกระดาษแข็งและความสามารถในการยืดหยุ่นต่ำกว่ามาก เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของเส้นใยกระดาษยังมีผลต่อค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางและเส้นใยกระดาษที่เติมลงไป โดยส่วนของโมเลกุลที่เคลื่อนไหวได้ยาก จะทำให้ได้ยางที่แข็งและมีความยืดหยุ่นลดลง จากภาพที่ 4.6 ยังพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยกระดาษมีผลทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันทั้งสองกรณีที่เติมเส้นใยทั้ง 2 ขนาด โดยค่าความแข็งจะมีความสอดคล้องกับทอร์กการวัลคาไนซ์และค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% นั่นคือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยกระดาษเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยกระดาษก็จะมีส่วนทำให้พันธะการเชื่อมโยงเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับความแตกต่างของค่าทอร์กต่ำสุด-สูงสุดของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้ด้วย



ภาพที่ 3.7 ค่าการสึกหรอของกระดาษหนึ่งเทียบจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ

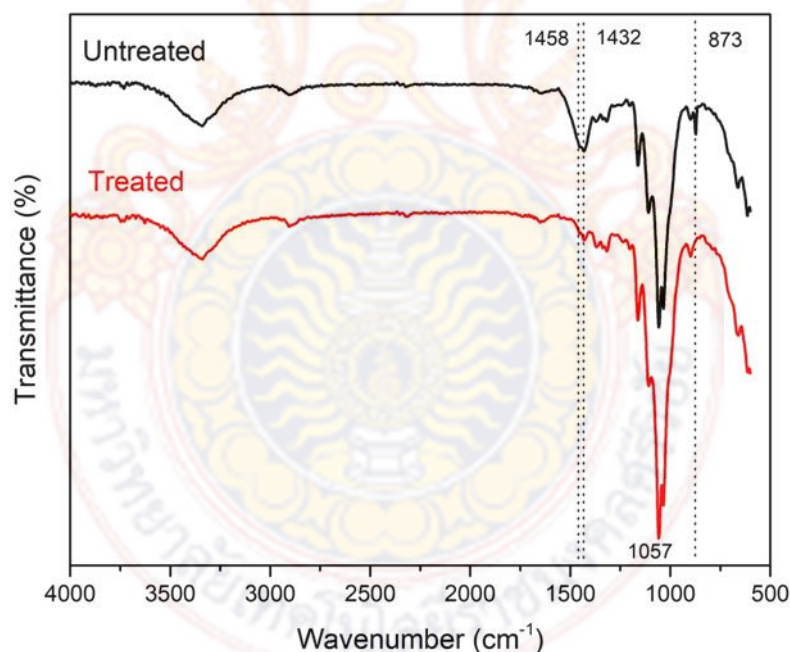
ภาพที่ 3.7 ค่าความทนทานต่อการสึกหรอของกระดาษหนึ่งเทียบถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าน้ำหนักที่หายไป (Abrasion loss) ต่อการหมุน 1 รอบ โดยจะทำการทดสอบแบบเทเบอร์ตามมาตรฐาน ASTM D3389-85a โดยจากภาพที่ 4.7 พบว่าค่าน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการขัดถูของกระดาษหนึ่งเทียบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของเส้นใยกระดาษที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มสูงขึ้นของค่าน้ำหนักที่หายไปของขึ้นตัวอย่างหมายถึงค่าความทนทานต่อการสึกหรอลดต่ำลง นั่นคือเมื่อปริมาณสัดส่วนของกระดาษเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนยางก็จะน้อยลง ซึ่งโดยธรรมชาติของยางธรรมชาติจะมีความเหนียว ความทนต่อการขัดถูและทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่ากระดาษ ดังนั้นเมื่อปริมาณของเส้นใยกระดาษเพิ่มสูง การหลุดลอกของกระดาษเมื่อโดนหินขัดถูจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเส้นใยกระดาษยังเห็นได้ชัดว่าการเติมเส้นใยขนาด 40 เมชที่ปริมาณต่ำ ๆ ค่าน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการขัดถูจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถอธิบายผลได้จากการกระจายตัวของเส้นใยกระดาษที่ดีในขึ้นตัวอย่างยาง ดังนั้นเมื่อเกิดการขัดถูกับหินขัด การหลุดลอกของกระดาษจึงเกิดขึ้นได้มากกว่ามากเมื่อเทียบกับการไม่เติมเส้นใยกระดาษ

### 3.2 อิทธิพลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ

จากการศึกษาสมบัติของกระดาษหนึ่งเทียบกับยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมซัลไฟเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยจะเลือกใช้เส้นใยขนาด 40 เมช ซึ่งให้สมบัติโดยรวมที่ดีกว่าเส้นใยขนาด 20 เมช ในหัวข้อที่ 2.3.3 โดยจะทำการบดผสมกับยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 3.2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกระดาษ

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกระดาษด้วยเทคนิค ATR-FTIR สำหรับเส้นใยที่จะทำการปรับสภาพผิวนั้น จะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลไฟเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวและไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ได้สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ของเส้นใยกระดาษตามที่ให้ไว้ในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ของเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (Untreated) เปรียบเทียบกับเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิว (Treated) ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์

ตารางที่ 3.4 สเปกตรัมแสดงช่วงเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเส้นใยกระดาษ

พีคการดูดกลืน Absorbance (cm <sup>-1</sup> )	ลักษณะการดูดกลืน
3100 – 3800	การยืดของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ -OH ในเซลลูโลส
2850 – 2970	การยืดแบบสั้นของหมู่ -CH <sub>2</sub> ในเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส
1650	การโค้งงอของ H-O-H ในโมเลกุลน้ำที่ดูดซับบนเส้นใย
1458	การโค้งงอของหมู่ -CH <sub>2</sub>
1432	การงอของ C-O-H ในระนาบ
1164	การยืดของหมู่ C-O ในเซลลูโลส
1140	การยืดของหมู่ C-O-C
1057 – 1047	การยืดแบบสั้นของหมู่ C-O/C-C
873	การยืดแบบสั้นของ C-O-C ในเซลลูโลส

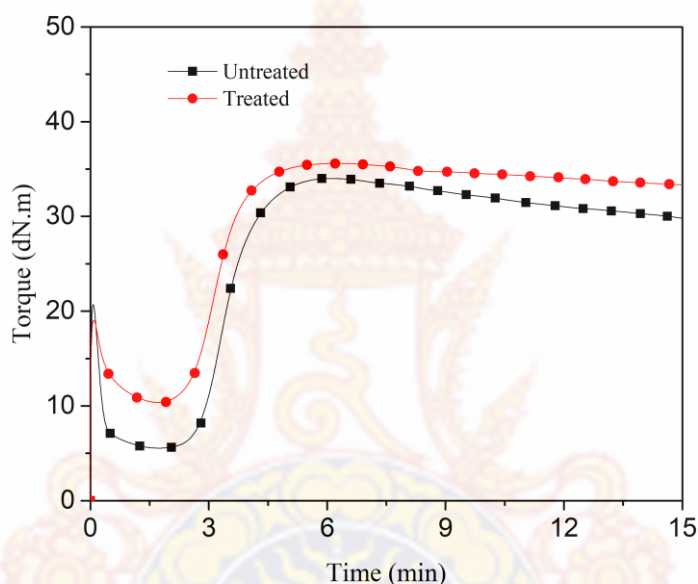
จากภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.4 พบว่า หลังการปรับสภาพผิวเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิติเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 873 cm<sup>-1</sup> หายไป ซึ่งเป็นลักษณะการยืดของพันธะ C-O-C ของหมู่เอเทอร์ในเซลลูโลส ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายต่าง (alkali treatment) ทำให้เกิดการชะล้างโครงสร้างที่เป็นเอเทอร์ออกไปบางส่วนจากผิวเส้นใยซึ่งมีผลทำให้ความเป็นขั้วของเส้นใยลดลงบางส่วน อย่างไรก็ตามจากพีคการดูดกลืนของเส้นใยหลังการปรับสภาพผิวยังพบว่ายังคงมีโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันเดิมของเซลลูโลสที่บ่งบอกถึงความเป็นขั้วอยู่นั้นหมายถึงว่าเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วยังคงมีความเป็นขั้วอยู่ในระดับหนึ่ง

### 3.2.2 สมบัติวัลคาไนซ์

จากการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียบจากยางธรรมชาติที่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษและยางธรรมชาติที่ไม่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษด้วยเครื่องทดสอบ ODR ที่อุณหภูมิ 160 °C ได้เวลาวัลคาไนซ์ ดังตารางที่ 3.5 และภาพที่ 3.9

ตารางที่ 3.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียบจากยางธรรมชาติที่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษและยางธรรมชาติที่ไม่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษ

Compound	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
Untreated	2.55	4.47	5.53	34.02	28.49
Treated	2.29	4.17	10.32	35.60	25.27



ภาพที่ 3.9 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียบจากยางธรรมชาติที่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษและยางธรรมชาติที่ไม่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษ

จากภาพที่ 3.9 แสดงเวลาวัลคาไนซ์ของสูตรยางธรรมชาติที่ปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษ เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ พบว่า สูตรยางที่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษให้เวลาการวัลคาไนซ์ที่เร็วกว่าสูตรยางธรรมชาติที่ไม่ปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษ อาจเกิดจากสารปรับสภาพผิวที่ทำให้เส้นใยกระดาษกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติจึงทำให้เวลาวัลคาไนซ์สั้นลง นอกจากนี้สารที่ไปปรับสภาพผิวมีสภาพความเป็นด่าง จึงส่งผลให้ความเป็นกรดของกระดาษลดลงจึงไปเร่งปฏิกิริยาการคงรูปให้เร็วขึ้น (Nashar *et al.*, 2004)

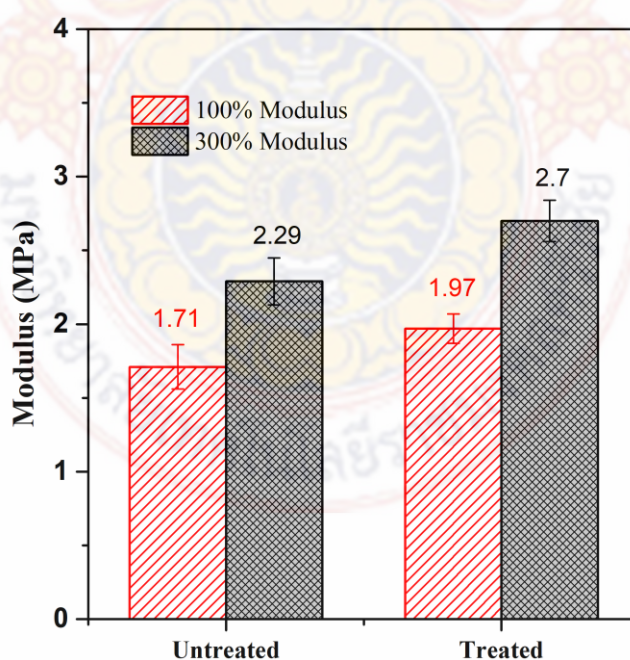
### 3.1.3 สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของกระดาษหนึ่งเทียบจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยจะเลือกใช้เส้นใยขนาด 40 เมช ซึ่งให้สมบัติโดยรวมที่ดีกว่าเส้นใยขนาด 20 เมช ในหัวข้อที่ 2.3.3 โดยจะทำการบดผสมกับยาง

ธรรมชาติเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ซึ่งการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ โมดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกด และค่าความแข็ง ของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษ แสดงค่าตามตารางที่ 3.6 และภาพที่ 3.10 – 3.13

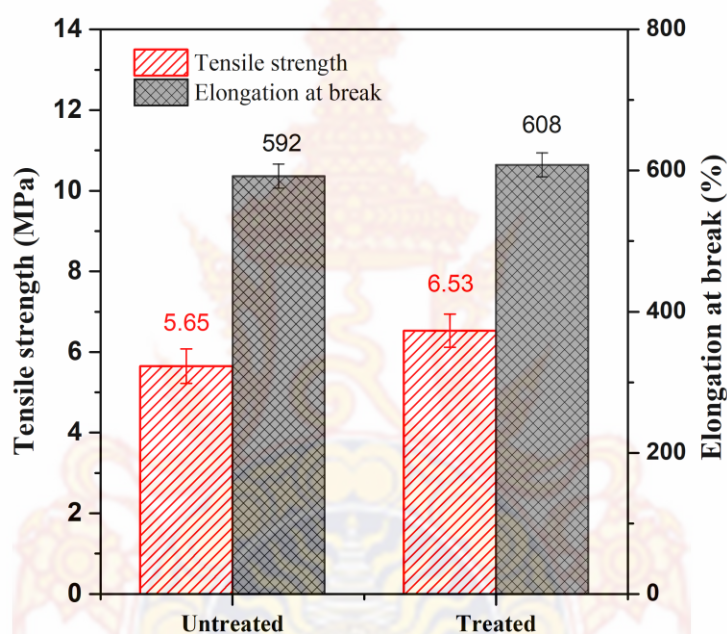
**ตารางที่ 3.6** สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิว

Properties	Untreated	Treated
100% Modulus (MPa)	1.71±0.15	1.97±0.10
300% Modulus (MPa)	2.29±0.16	2.70±0.14
Tensile strength (MPa)	5.65±0.43	6.53±0.41
Elongation at break (%)	592±17	608±17
Tear strength (N/mm)	33.77±1.25	35.40±1.11
Abrasion loss (mg/cycle)	0.92±0.06	0.75±0.05
Compression set (%)	39.88±1.03	44.29±1.00
Hardness (Shore A)	64.37±2.37	62.30±1.93



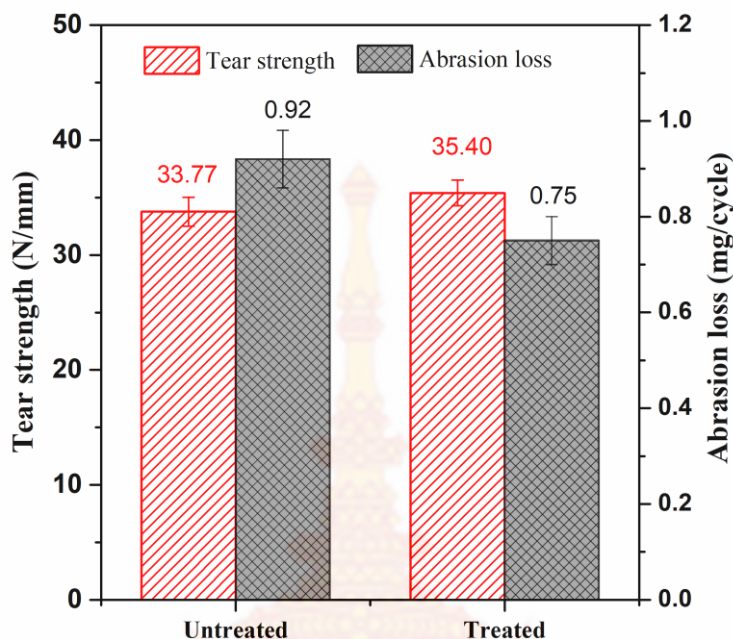
**ภาพที่ 3.10** ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับและไม่ปรับสภาพผิว

จากภาพที่ 3.10 พบว่าค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของกระดาษหนังเทียมที่เติมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วจะมีค่าสูงกว่าการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวมีการกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่า ดังนั้นตัวเส้นใยกระดาษซึ่งมีความแข็งมากกว่ายาง จึงทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงที่ส่งผ่านมาจากยางธรรมชาติเมื่อเกิดการดึงยืด ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการยืด นอกจากนี้การปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษยังทำให้เกิดความเข้ากันได้ดีมากว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว การส่งผ่านแรงจึงเกิดขึ้นได้ดีมากกว่าระหว่างผิวของเส้นใยกระดาษและสายโซ่โพลิเมอร์ของยางธรรมชาติ



ภาพที่ 3.11 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับและไม่ปรับสภาพผิว

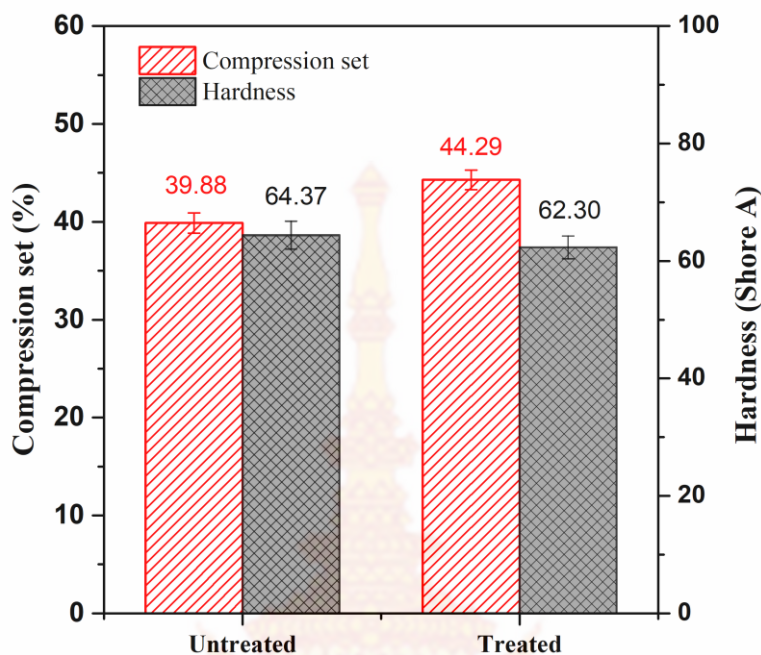
จากภาพที่ 3.11 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของกระดาษหนังเทียม พบว่ากระดาษหนังเทียมที่ผสมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษผสมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวทั้งสองสมบัติ สาเหตุของการปรับปรุงของสมบัติเชิงกลสืบเนื่องมาจากผลของสารปรับสภาพผิวโซเดียมซัลไฟต์และแมกนีเซียมคลอไรด์ ทำให้กระดาษกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น เส้นใยกระดาษและยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้มากขึ้น ดังนั้นการส่งผ่านแรงเมื่อเกิดการดึงยืดจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Nashar *et. al.*, (2004)



ภาพที่ 3.12 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดและค่าการทนทานต่อการสึกหรอของกระดาษหนังเทียม จากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับและไม่ปรับสภาพผิว

ภาพที่ 3.12 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดและการทนทานต่อการสึกหรอ ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนังเทียมที่เติมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้วจะให้ค่าสูงกว่าการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวเล็กน้อย ทั้งนี้สิ่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้นคือเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวจะกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ดังนั้นตัวเส้นใยกระดาษที่เติมลงไปในยางในยางทำให้เกิดการขัดขวางแรงที่ใช้ในการฉีกขาด การขยายตัวของรอยฉีกขาดจึงเกิดได้ยากขึ้น (Ismail *et al.*, 1997) นอกจากนี้การปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษยังทำให้เกิดความเข้ากันได้ดีมากกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว การส่งผ่านแรงจึงเกิดขึ้นได้ดีมากกว่าระหว่างผิวของเส้นใยกระดาษและสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังนั้นความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนังเทียมที่เติมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวแล้วจึงให้ค่าที่สูงกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนทานต่อการสึกหรอพบว่าการปรับปรุงสภาพผิวของเส้นใยกระดาษยังทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดถูต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการเข้ากันได้มากขึ้นระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ ดังนั้นจึงทำให้เกิดความแข็งแรงสูงขึ้น เกิดการยึดเหนี่ยวกันที่ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างผิวของเส้นใยกับยางธรรมชาติ จึงทำให้กระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้จึงมีความทนทานต่อการขัดถูมากกว่า น้ำหนักที่หายไปจึงต่ำกว่า





ภาพที่ 3.13 ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดและค่าความแข็งของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับและไม่ปรับสภาพผิว

จากภาพที่ 3.13 พบว่าค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดของกระดาษหนังเทียมที่เติมเส้นใยกระดาษที่ผ่านการปรับสภาพผิวจะให้ค่าที่สูงกว่าการเติมเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว การผิดรูปที่มากขึ้นหรือการคืนรูปของยางที่ต่ำลง สาเหตุอาจเกิดจากถึงแม้ว่าเส้นใยกระดาษจะมีการกระจายตัวที่ดีกว่า แต่ผลของสารปรับสภาพผิวโซเดียมซิลิเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์ที่เติมลงไป อาจเป็นตัวขัดขวางการคืนรูปของยาง ทำให้ยางนิ่มลงเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าความแข็งที่ต่ำกว่าการเติมเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ดังนั้นการคืนรูปซึ่งเป็นสมบัติที่ได้จากยางจึงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเติมเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้สารปรับสภาพผิวที่เติมลงไป อาจทำให้เกิดการยึดติดกันได้มากขึ้นของเส้นใยกระดาษเมื่อให้แรงกด ดังนั้นเมื่อเอาแรงที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างออก การคืนรูปกลับของกระดาษจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่า ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดจึงสูงกว่าแต่ค่าความแข็งที่ได้มีค่าต่ำกว่า

### 3.3 อิทธิพลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ

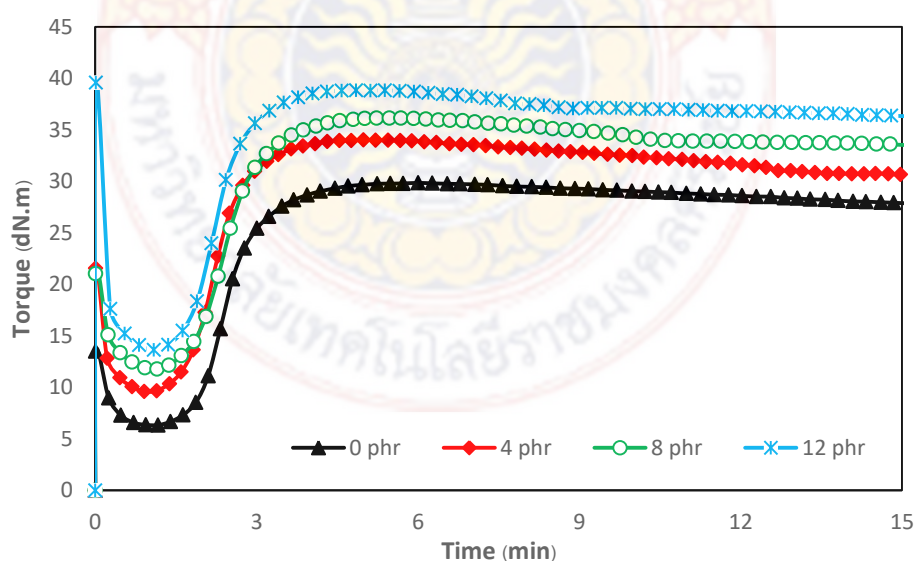
จากการศึกษาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยจะเลือกใช้เส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิว ซึ่งให้สมบัติที่ดีกว่าเส้นใยกระดาษที่ทำการไม่ปรับสภาพผิว ในหัวข้อที่ 3.3.4 ได้ทำการเลือกใช้ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการใช้จะทำการศึกษาที่ 0, 4, 8, 12 phr เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษได้ผลการทดลองดังนี้

### 3.3.1 สมบัติวัลคาไนซ์

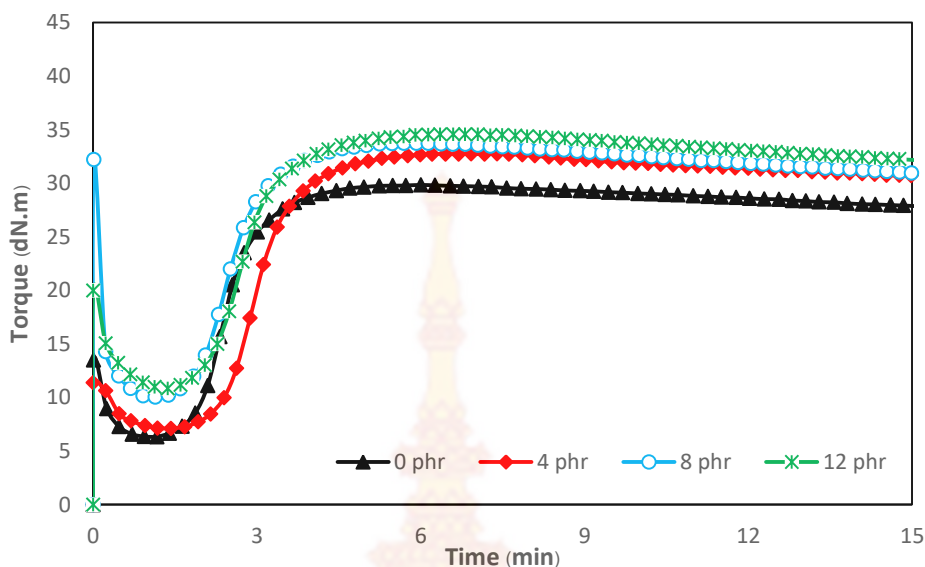
จากการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยเครื่องทดสอบ ODR ที่อุณหภูมิ 160 °C ได้เวลาวัลคาไนซ์ แสดงค่าดังตารางที่ 3.7 และภาพที่ 3.14 และ 3.15

ตารางที่ 3.7 สมบัติการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งที่ยมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่เต็มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์

ENR content (phr)	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
ENR - 25					
0	1.64	3.45	6.34	29.85	23.50
4	1.42	3.10	9.59	34.01	24.42
8	1.52	3.41	11.76	36.13	24.37
12	1.45	3.12	13.62	38.84	25.63
ENR - 50					
4	2.04	4.07	7.12	32.75	25.63
8	1.64	3.60	10.03	33.72	23.70
12	1.82	3.89	10.85	34.57	23.72



ภาพที่ 3.14 อิทธิพลของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ในช่วงระยะเวลาที่ยางเกิดการวัลคาไนซ์



ภาพที่ 3.15 อิทธิพลของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ในช่วงระยะเวลาที่ Yang เกิดการวัลคาไนซ์

จากภาพที่ 3.14 และ 3.15 พบว่า ลักษณะการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียมจากยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ แสดงพฤติกรรมของการวัลคาไนซ์ของยางที่ไม่แตกต่างกัน นั่นคือ ค่าทอร์กของยางวัลคาไนซ์ทั้งในกรณีของค่าทอร์กต่ำสุดและค่าทอร์กสูงสุดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการที่หม้ออีพอกไซด์บนสาย โซโม่เลกุลยางจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษดีขึ้น อีกทั้งอาจมีผลทำให้เส้นใยกระดาษกระจายตัวในยางดีขึ้น จึงมีผลต่อการส่งผ่านแรงที่เกิดขึ้นได้ดี ทำให้ต้องใช้แรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ค่าทอร์กของยางจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าเวลาการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียมที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าที่สูงกว่าการแปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเป็นขี้ที่สูงของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไปรบกวนปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ โดยที่หม้ออีพอกไซด์อิสระบางส่วนสามารถที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารตัวเร่งที่มีความเป็นขี้ได้ จึงมีผลทำให้เกิดการดูดซับของสารตัวเร่งในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ อีกทั้งความแตกต่างของความเป็นขี้ระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้สารเคมีที่มีความเป็นขี้มากกว่าสามารถเคลื่อนย้ายเข้าสู่เฟสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงมีผลทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ช้าลง (Sengloyluan et al., 2014)

### 3.3.2 สมบัติเชิงกล

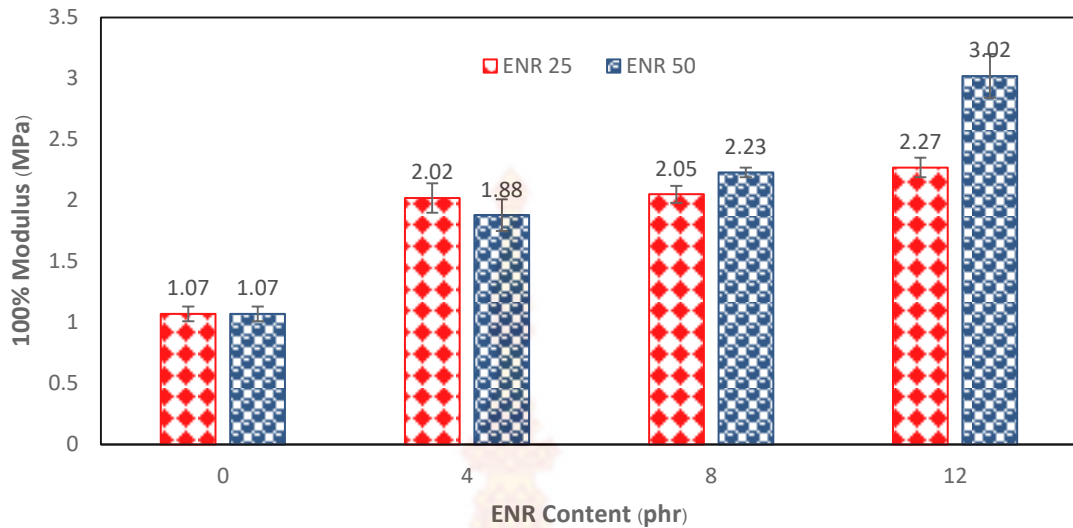
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับได้แก่ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ในปริมาณการเติมเส้นใยกระดาษที่ 20 phr ได้แก่ 100% และ 300% โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดจนขาด ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง ความทนทานต่อการสึกหรอและการคืนตัวหลังการกด แสดงค่าตามตารางที่ 3.8 - 4.9 และภาพที่ 3.16 - 3.25

ตารางที่ 3.8 สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

Type of ENR	ENR content (phr)	100% modulus (MPa)	300% modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
ENR-25	0	1.07±0.06	1.78±0.07	5.94±0.12	692±10
	4	2.02±0.12	2.75±0.09	5.04±0.10	560±28
	8	2.05±0.07	2.83±0.10	7.93±0.09	624±29
	12	2.27±0.08	2.99±0.09	4.47±0.11	508±30
ENR-50	4	1.88±0.13	2.36±0.03	3.29±0.11	484±10
	8	2.23±0.04	2.63±0.04	2.83±0.18	364±21
	12	3.02±0.18	3.46±0.12	3.94±0.13	380±0

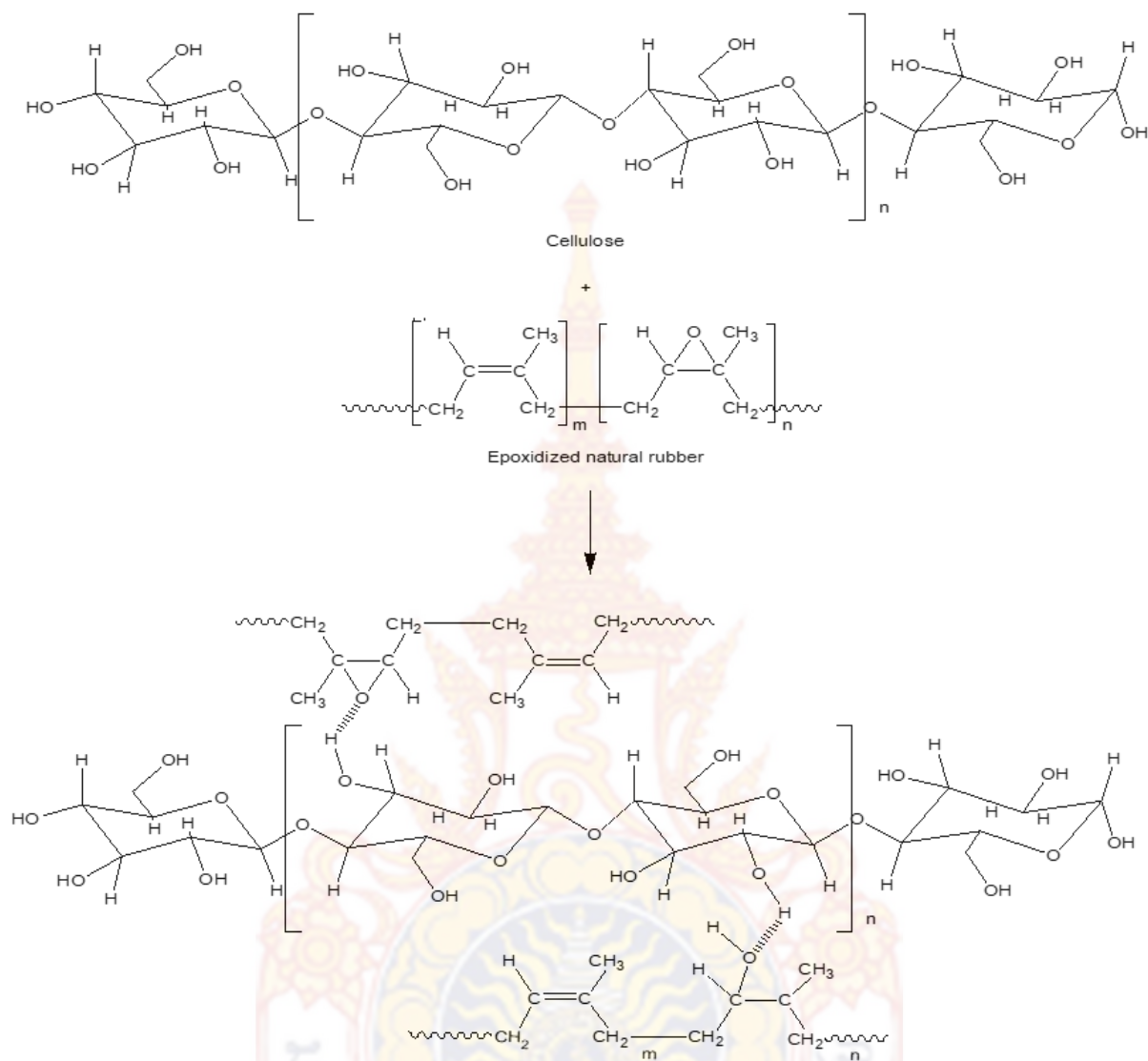
ตารางที่ 3.9 สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ต่อ)

Type of ENR	ENR content (phr)	Tear strength (N/mm)	Abrasion loss (mg/cycle)	Compression set (%)	Hardness (Shore A)
ENR-25	0	6.92±0.90	0.15±0.02	34.71±1.53	57.1±1.01
	4	36.14±0.10	0.95±0.04	31.88±1.26	59.2±0.29
	8	35.73±0.11	1.05±0.03	32.93±1.30	64.1±2.40
	12	35.67±0.20	1.08±0.01	28.64±1.11	66.4±1.85
ENR-50	4	22.28±0.10	0.95±0.06	30.34±0.60	61.4±1.86
	8	24.75±1.00	1.34±0.05	33.33±1.00	61.7±1.57
	12	26.22±0.20	1.37±0.03	34.3±0.60	62.3±0.20

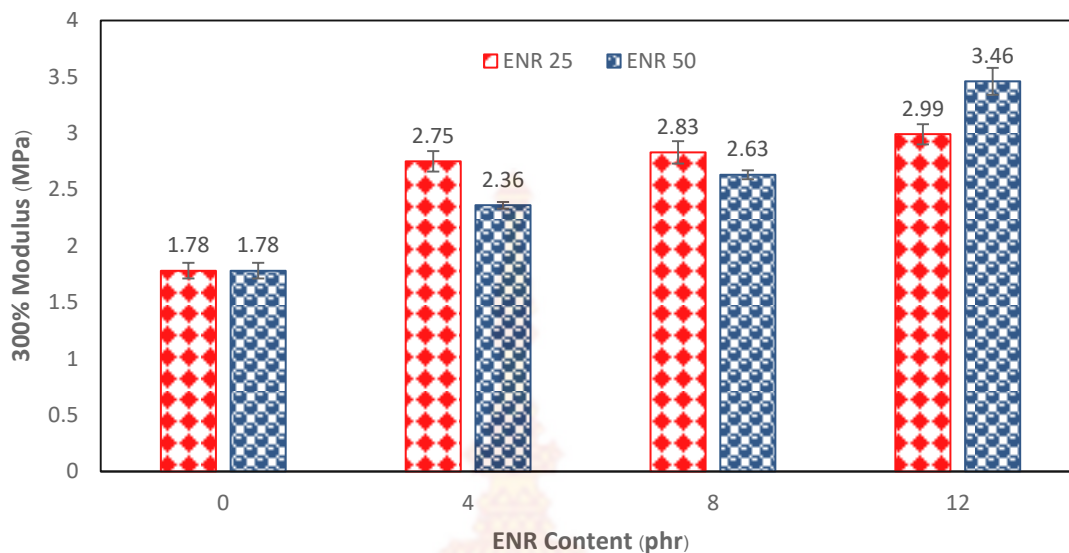


ภาพที่ 3.16 ค่า 100% โมดูลัสที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 3.16 แสดงค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับได้แก่ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ในปริมาณการเติมเส้นใยกระดาษที่ 20 phr พบว่าค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์เนื่องจากการที่มีหมู่อีพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษดีขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า 100% โมดูลัสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะพบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีค่าโมดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการมีหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้าง สามารถที่จะเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีบนเส้นใยกระดาษด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังปฏิกิริยาที่สามารถเป็นได้แสดงดังภาพที่ 3.17 ซึ่งจะมีผลทำให้ยางมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

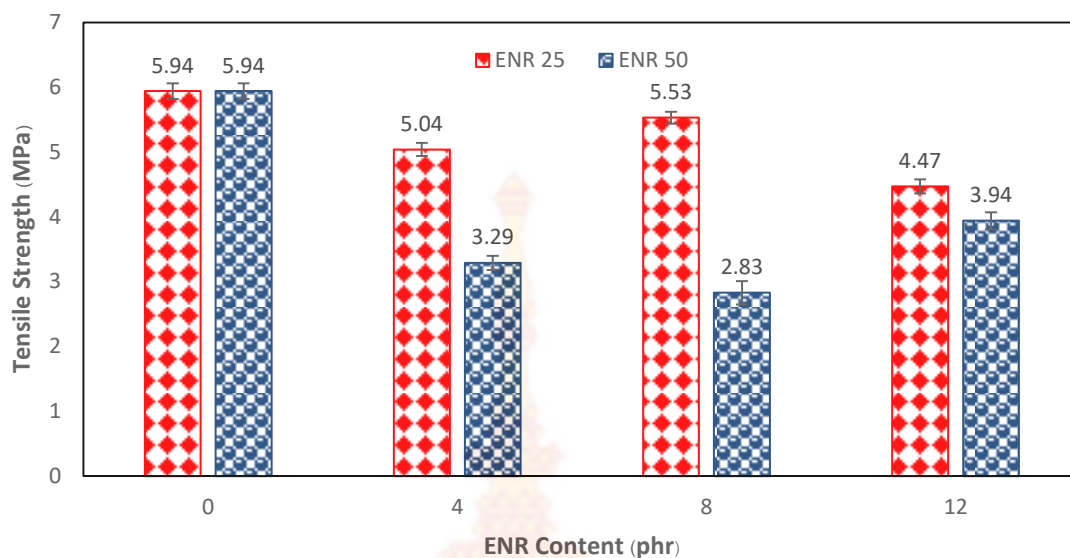


ภาพที่ 3.17 อันตรกิริยาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเส้นใยกระดาษ



ภาพที่ 3.18 ค่า 300% โมดูลัสที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

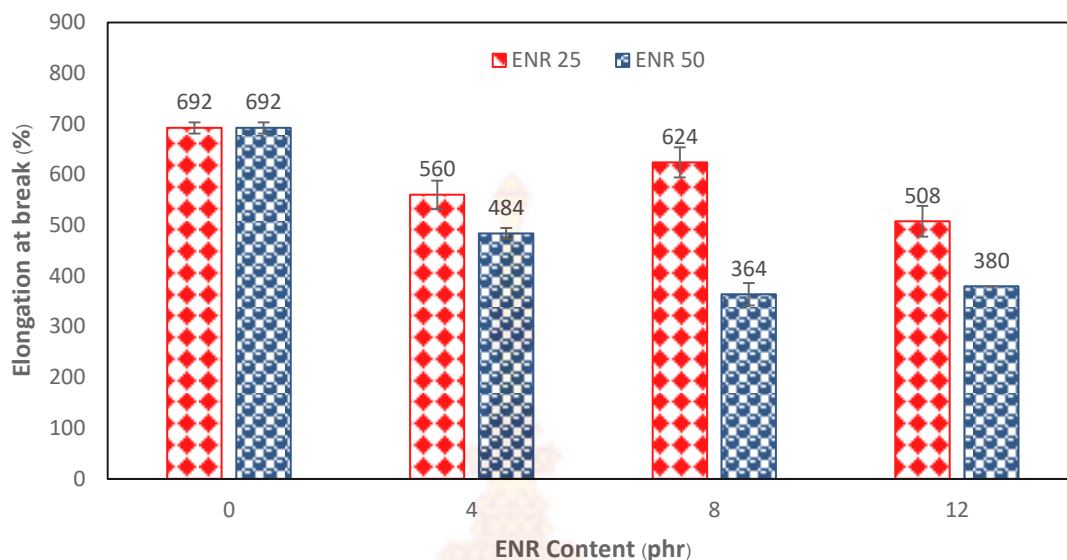
ภาพที่ 3.18 แสดงค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% พบว่าค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์เช่นเดียวกับค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% ทั้งนี้เนื่องจากการมีหมู่อีพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษดีขึ้น การส่งผ่านแรงจึงเกิดขึ้นได้ดีมากกว่าระหว่างผิวของเส้นใยกระดาษและสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่แตกต่างกันพบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีค่าโมดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์อาจจะมีความเป็นขั้วที่พอดีและเหมาะสมมากกว่าจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยกระดาษได้มากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ได้สูงกว่า



ภาพที่ 3.19 ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

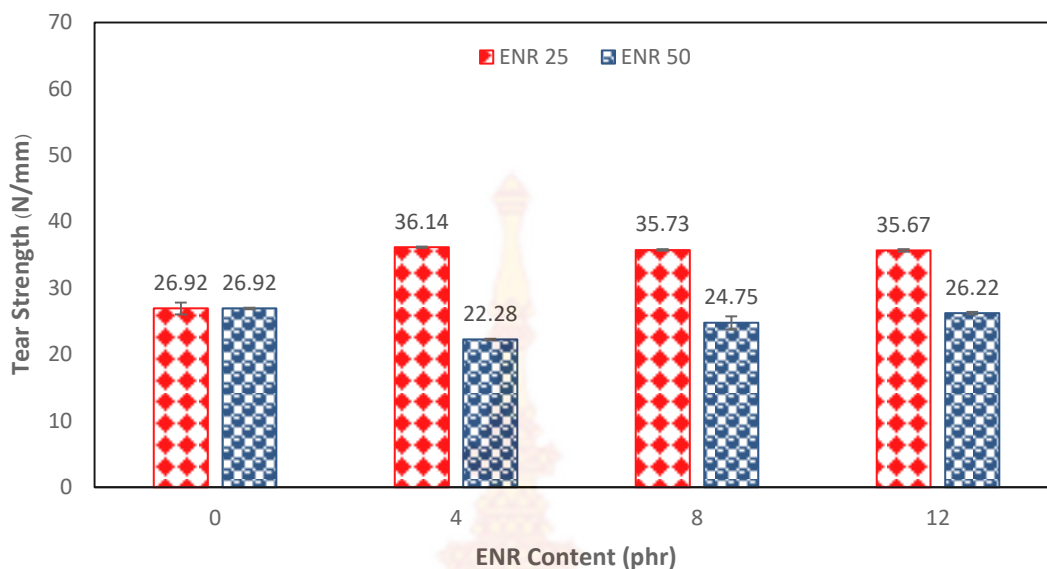
ภาพที่ 3.19 แสดงสมบัติความทนทานต่อแรงดึง พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ซึ่งโดยทั่วไปความทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติเกิดจากความสามารถในการตกผลึกของยางที่ระยะยืดสูง ๆ หรือการเสริมแรงจากสารตัวเติมที่ใส่ลงไปในยาง ซึ่งการเติมเส้นใยกระดาษที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ลงไปในยางธรรมชาติ ผลของการเสริมแรงจากเส้นใยกระดาษจึงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผลของการตกผลึกของยางธรรมชาติ ดังนั้นผลของการทนทานต่อแรงดึงจึงเป็นผลจากการตกผลึกของยางธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งอาจเกิดจากความสามารถในการตกผลึกเมื่อดึงยืดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ปกติจะความสามารถตกผลึกได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ จึงทำให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติลดต่ำลง และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า 50 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อดึงยืดจะมีการตกผลึกได้มากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ อีกทั้งผลของความเป็นขั้วที่เหมาะสมมากกว่าจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยกระดาษได้มากกว่า จึงส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่า





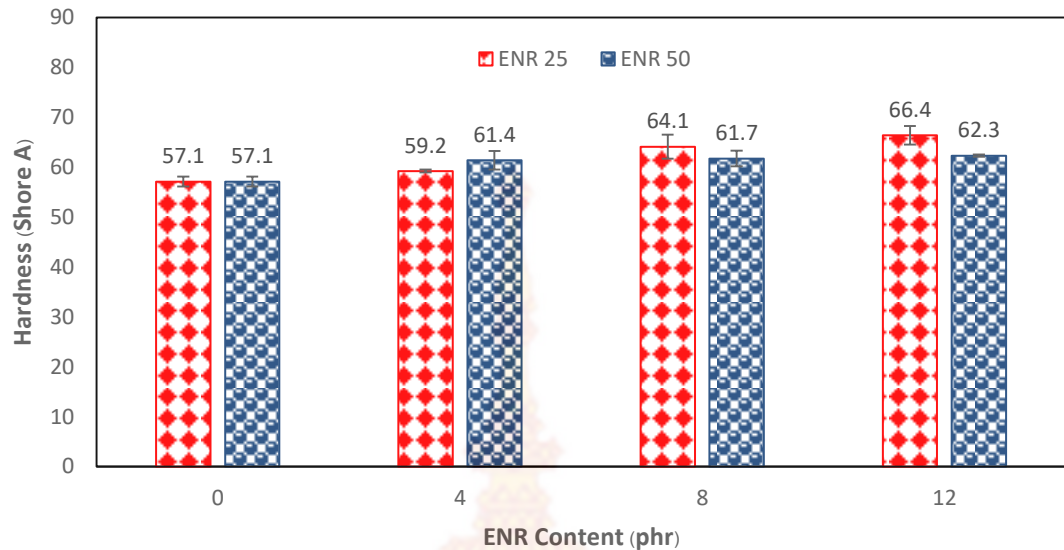
ภาพที่ 3.20 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 3.20 แสดงค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ซึ่งผลที่ได้จะมีความคล่องคล่องกับความทนทานต่อแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากการมีหมู่อิพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติทำให้การตกผลึกของยางธรรมชาติลดลงซึ่งเกิดจากความสามารถในการตกผลึกของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติลดลง อีกทั้งการมีหมู่อิพอกไซด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติจะทำให้แรงดึงดูดยกในระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความสามารถในการยืดของยางลดลง (กนกวรรณ, 2549) และเมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการยืดจนขาดยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่แตกต่างกันพบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อถึงยืดจะมีการตกผลึกได้มากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ อีกทั้งผลของความเป็นขั้วที่เหมาะสมมากกว่าจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยกระดาษได้มากกว่าจึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดความสูงกว่า



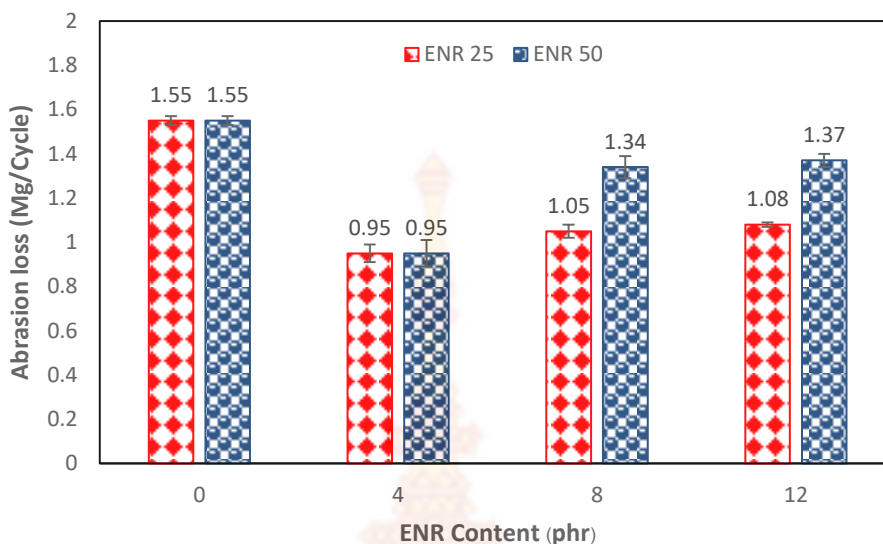
ภาพที่ 3.21 ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 3.21 แสดงสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด พบว่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ เนื่องจากการมีหมู่อิพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษดีขึ้น การส่งผ่านแรงจึงเกิดขึ้นได้ดีมากกว่าระหว่างผิวของเส้นใยกระดาษและสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ต่างกัน พบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์อาจจะมีความเป็นขั้วที่เหมาะสมกว่าจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยกระดาษได้มากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ได้จึงสูงกว่า



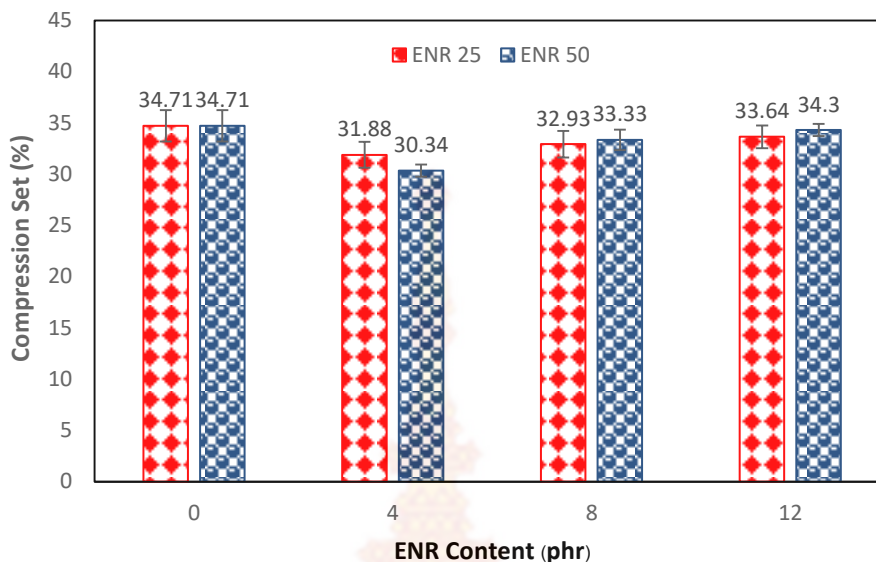
ภาพที่ 3.22 ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

จากภาพที่ 3.22 แสดงสมบัติความแข็ง พบว่าค่าความแข็งของยางธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ เนื่องจากการมีหมู่อิพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางทำให้เกิดการส่งผ่านแรงและการยึดเหนี่ยวระหว่างยางธรรมชาติกับเส้นใยกระดาษดีขึ้น การกระจายตัวของเส้นใยกระดาษในยางจึงดีขึ้นทำให้ความแข็งของยางเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีค่าความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์อาจจะมีความเป็นขั้วที่เหมาะสมกว่าจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยกระดาษได้มากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความแข็งของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ได้สูงกว่า



ภาพที่ 3.23 ค่าความทนทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 3.23 แสดงสมบัติความทนทานต่อการสึกหรอ พบว่าเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักในการขัดถูมีแนวโน้มลด เนื่องจากการมีหมู่อีพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางจะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษดีขึ้นจึงทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการขัดถูมากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ต่างกัน พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์มีความทนทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์อาจจะมีความเป็นขี้ที่เหมาะสมกว่าแต่ในส่วนของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีความเป็นขี้สูงเกินไปจึงทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษเกิดขึ้นได้ไม่ดีทำให้ค่าความทนทานต่อการขัดถูจึงต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3.24 ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 3.24 แสดงค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดของยางธรรมชาติที่ปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดสูงแต่เมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะทำให้ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการมีหมู่อิพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลยางจะทำให้การยึดเหนี่ยวและการส่งผ่านแรงระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษในสายโซ่โมเลกุลของยางดีขึ้น ทำให้การคืนรูปของยางดีขึ้น ส่งผลให้ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดลดลง และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์มีค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดต่ำกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์อาจจะมีความเป็นขั้วที่ต่ำกว่า จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยกระดาษแต่ในส่วนของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีความเป็นขั้วสูงเกินไปอาจทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษเกิดได้ขึ้นได้ไม่ดี ทำให้ค่าการผิดรูปเนื่องจากการกดการของยางธรรมชาติ อิพอกไซด์ที่ 50 โมลเปอร์เซ็นต์สูงกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ 25 โมลเปอร์เซ็นต์

### 3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า

จากการศึกษาสมบัติของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ได้ทำการเลือกใช้ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการใช้จะทำการศึกษาที่ 0, 4, 8, 12 phr ในปริมาณ

การเติมเส้นใยกระดาษที่ 20 phr ซึ่งทำการบดผสมกับยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า ได้ผลการทดลองดังนี้

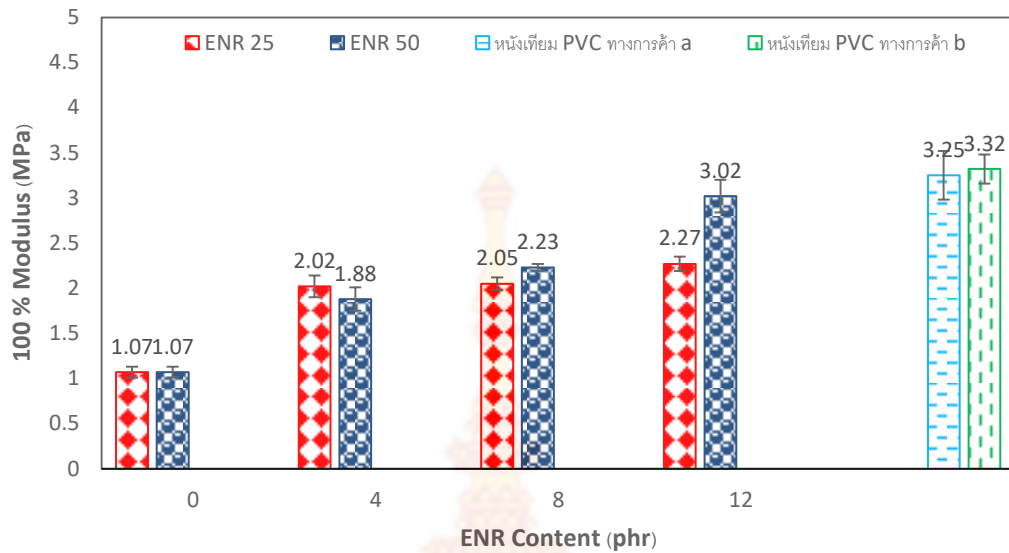
### 3.4.1 สมบัติเชิงกล

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ 25 และโมลเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า ได้แก่ 100% และ 300% โมดูลัสความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดจนขาด ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง แสดงค่าตามตารางที่ 3.10 และภาพที่ 3.25- 3.29

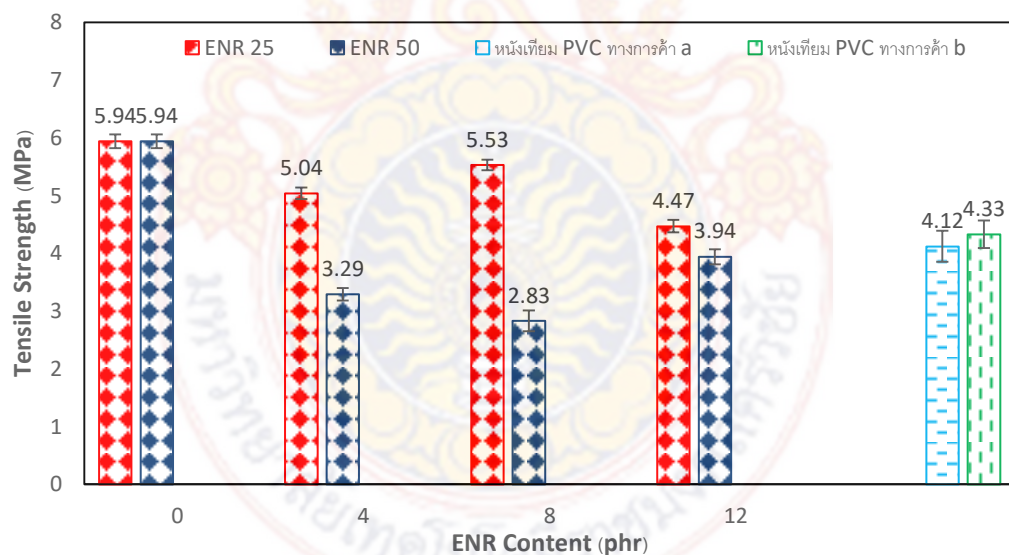
ตารางที่ 3.10 สมบัติเชิงกลของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า

Type of ENR	ENR content (phr)	100% modulus (MPa)	300% modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
25	0	1.07±0.06	1.78±0.07	5.94±0.12	692±10
	4	2.02±0.12	2.75±0.09	5.04±0.10	560±28
	8	2.05±0.07	2.83±0.10	7.93±0.09	624±29
	12	2.27±0.08	2.99±0.09	4.47±0.11	508±30
50	4	1.88±0.13	2.36±0.03	3.29±0.11	484±10
	8	2.23±0.04	2.63±0.04	2.83±0.18	364±21
	12	3.02±0.18	3.46±0.12	3.94±0.13	380±0
หนังเทียม PVC ทางการค้า a		3.25±0.27	-*	4.12±0.27	160±20
หนังเทียม PVC ทางการค้า b		3.32±0.16	-*	4.33±0.24	200±0

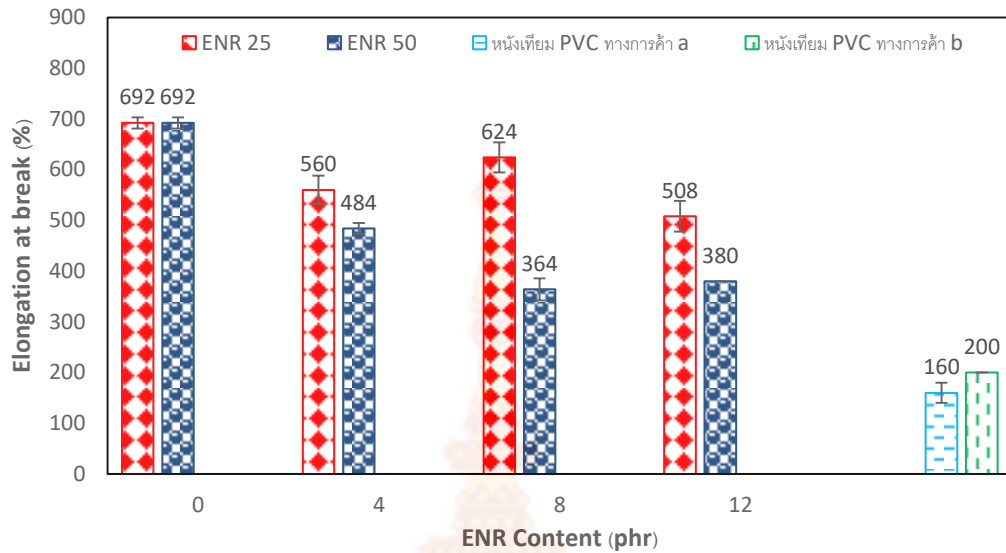
หมายเหตุ : \* ไม่สามารถทดสอบได้



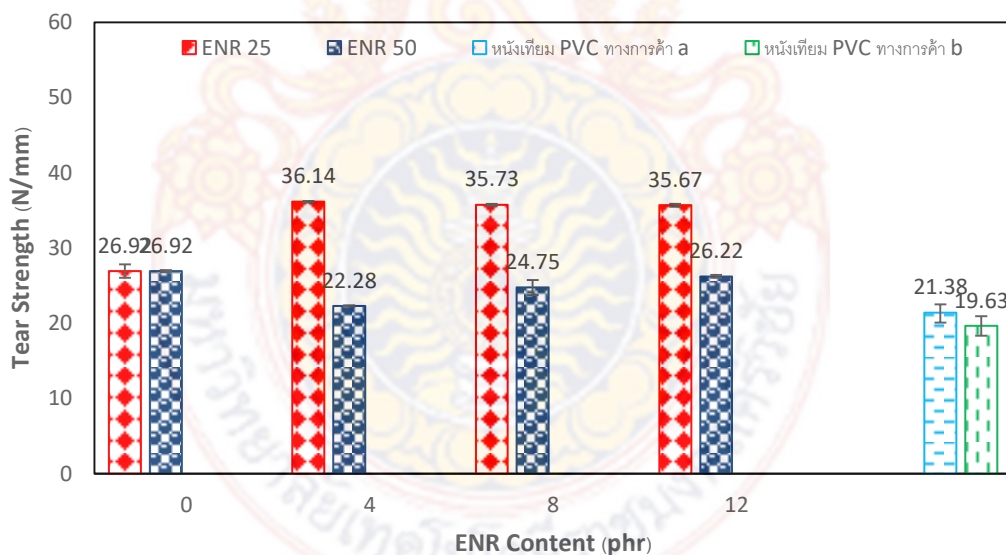
ภาพที่ 3.25 ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100% ของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า



ภาพที่ 3.26 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า

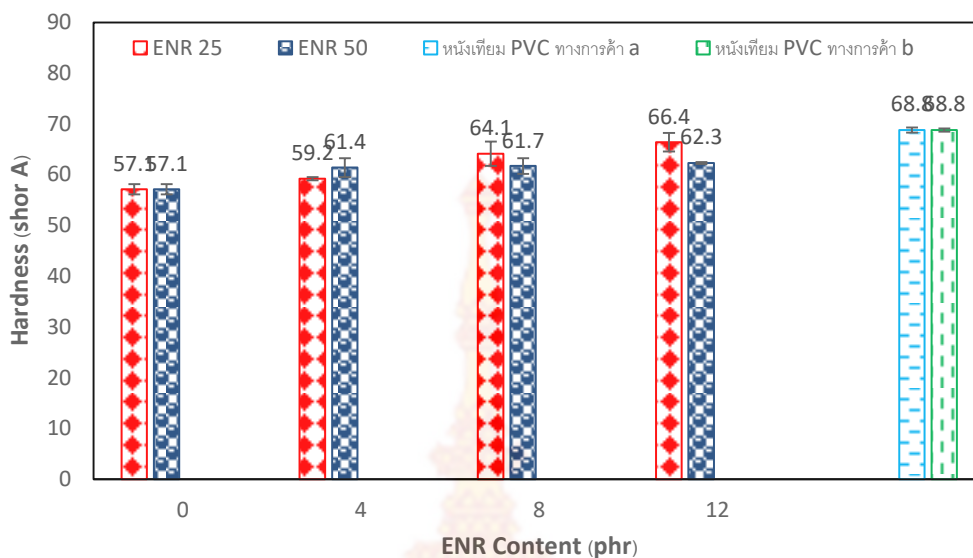


ภาพที่ 3.27 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า



ภาพที่ 3.28 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า





ภาพที่ 3.29 ค่าความแข็งของกระดาษหนังเทียมจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมเลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติโอพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้า

จากภาพที่ 3.25 – 3.29 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนังเทียมในทางการค้าโดยจะทำการศึกษาจากสมบัติเชิงกล พบว่าค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 % และค่าความแข็งของกระดาษหนังเทียมในทางการค้าจะมีค่าที่สูงกว่ากระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้ เนื่องจากกระดาษหนังเทียมในทางการค้าจะมีความเป็นพลาสติกที่สูงกว่าส่งผลให้ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 % และค่าความแข็งที่ได้จึงสูงกว่ากระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้ แต่ในทางกลับกันค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้จะมีค่าที่สูงกว่ากระดาษหนังเทียมในทางการค้า เนื่องจากกระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้จะมีความเป็นยางที่สูงกว่าจึงส่งผลให้มีความยืดหยุ่นดีกว่ากระดาษหนังเทียมในทางการค้าดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่ากระดาษหนังเทียมที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ากระดาษหนังเทียมในทางการค้า

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผลการทดลอง

##### 4.1.1 อิทธิพลของขนาดและปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

จากการศึกษาแปรปริมาณของเส้นใยกระดาษที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยการแปรปริมาณที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr โดยแปรขนาด 20 และ 40 เมช พบว่าเวลาวัลคาไนซ์ของยางไม่แตกต่างกัน นั่นคือ ค่าทอร์กของยางวัลคาไนซ์ทั้งในกรณีของค่าทอร์กต่ำสุด และค่าทอร์กสูงสุด จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยกระดาษที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเส้นใยกระดาษซึ่งปกติจะมีความแข็งมากกว่ายาง การเพิ่มปริมาณของเส้นใยกระดาษจึงเป็นการเพิ่มสัดส่วนของแข็งลงไปในการทำให้ความหนืดของยางเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้พบว่าเวลาการสกอชและเวลาการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียบที่เติมเส้นใยกระดาษขนาด 40 เมช มีค่าที่สูงกว่าการเติมเส้นใยกระดาษขนาด 20 เมช ทั้งนี้อาจเกิดจากธรรมชาติของเส้นใยกระดาษที่มีความเป็นขั้วมากกว่ายางธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยกระดาษค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์และ 300 เปอร์เซ็นต์ ค่าการบิดรูปเนื่องจากการกด ค่าความแข็งและค่าความทนทานต่อการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงและ ค่าความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเส้นใยกระดาษลงไปเพิ่มสูงขึ้นอาจเกิดจากเมื่อปริมาณของเส้นใยกระดาษเพิ่มสูงขึ้น การจับกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยกระดาษเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ก่อให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอในชิ้นตัวอย่างยางเนื่องมาจากการลดลงของความยืดหยุ่นของสายโซ่ยางส่งผลให้คอมโพสิตแข็งขึ้น

##### 4.1.2 อิทธิพลของการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ

จากการศึกษาสมบัติของกระดาษหนึ่งเทียบจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตและแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยจะเลือกใช้เส้นใยขนาด 40 เมช ซึ่งให้สมบัติโดยรวมที่ดีกว่าเส้นใยขนาด 20 เมช พบว่าสูตรยางที่มีการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษให้เวลาการวัลคาไนซ์ที่เร็วกว่าสูตรยางธรรมชาติที่ไม่ปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษอาจเกิดจากการปรับสภาพผิวที่ทำให้เส้นใยกระดาษกับยางธรรมชาติมีการกระจายตัวเข้ากันได้ดีจึงทำให้เวลาวัลคาไนซ์สั้นลงและจากการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์และ 300 เปอร์เซ็นต์ ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดจนขาด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะมีค่าสูงกว่าการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว แต่ในขณะที่ค่าความแข็งจะต่ำกว่าการเติมเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวซึ่งจะสอดคล้องกับค่าการทนทานต่อการสึกหรอและการ

คือนรูปลักษณ์การกด เนื่องจากการปรับสภาพผิวของเส้นใยกระดาษทำให้ยางนิ่มลงเล็กน้อย จะเห็นได้จากค่าความแข็งที่ต่ำกว่าการเติมเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ดังนั้นการคั้นรูปลักษณ์การกดซึ่งเป็นสมบัติที่ได้จากยางจึงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเติมเส้นใยกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้สารปรับสภาพผิวที่เติมลงไปอาจทำให้เกิดการยึดติดกันได้มากขึ้นระหว่างยางกับเส้นใยกระดาษเมื่อให้แรงกดส่งผลให้การคั้นรูปลักษณ์ของยางจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า

#### 4.1.3 อิทธิพลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยกระดาษ

จากการศึกษาผลของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์โดยจะเลือกใช้เส้นใยกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิว ซึ่งให้สมบัติที่ดีกว่าเส้นใยกระดาษที่ทำการไม่ปรับสภาพผิว ได้ทำการเลือกใช้ที่ปริมาณแตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการใช้จะทำการศึกษาที่ 0, 4, 8, 12 phr ซึ่งผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับการทดสอบ คือ ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางที่ไม่แตกต่างกัน นั่นคือ ค่าทอร์กของยางวัลคาไนซ์ทั้งในกรณีของค่าทอร์กต่ำสุด และค่าทอร์กสูงสุด จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้พบว่าเวลาการสกอซและเวลาการวัลคาไนซ์ของกระดาษหนึ่งเทียมนั้นแปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่ปริมาณ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าที่สูงกว่าที่ปริมาณ 25 โมลเปอร์เซ็นต์อาจเกิดจากยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่ปริมาณ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเป็นขั้วที่สูงของยางธรรมชาติอพอกไซด์ไปรบกวนปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติของยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ที่มีสภาพขั้วในยางธรรมชาติ จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงได้ดี ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด ค่าความทนทานต่อการสึกหรอและการผิอรูปลักษณ์หลังจากการกด จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์ เนื่องจากสมบัติของยางธรรมชาติอพอกไซด์ส่งผลให้ความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติลดลงการมีหมู่ไฮดรอกซิลบนหมู่โมเลกุลของยางธรรมชาติทำให้โมเลกุลมีความสามารถในการยึดต่อด้านค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลงและแรงดึงดูภายในระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้นทำให้ยางมีค่าระยะยืดจนขาดลดลง

#### 4.1.4 ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษหนึ่งเทียมนที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับกระดาษหนึ่งเทียมนในทางการค้า

จากการศึกษาผลของกระดาษหนึ่งเทียมนจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยกระดาษที่แปรปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติอพอกไซด์เปรียบเทียบกับกระดาษหนึ่งเทียมนในทางการค้า พบว่าค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์และค่าความแข็งของกระดาษหนึ่งเทียมนในทางการค้ามีค่าที่สูงกว่ากระดาษหนึ่งเทียมนที่เตรียมได้แต่ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถใน

การยืดขนาดและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงอย่างไรก็ตามการที่สมบัติของกระดาษหนึ่งเทียบในทางการค้ามีคุณสมบัติที่ดีกว่ากระดาษหนึ่งเทียบที่เตรียมได้ อาจเกิดจากกระดาษหนึ่งเทียบที่เตรียมได้จะมีความเป็นยางที่สูงกว่าจึงส่งผลให้มีความยืดหยุ่นดีกว่ากระดาษหนึ่งเทียบในทางการค้า ดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่ากระดาษหนึ่งเทียบที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ากระดาษหนึ่งเทียบในทางการค้า

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 อาจจะมีการศึกษาการใช้สารตัวเติมร่วมกับเส้นใยกระดาษที่เหลือใช้ในสำนักงานในบาง เพื่อช่วยในการลดต้นทุนและช่วยในเรื่องของสมบัติยางวัลคาไนซ์ให้ดีขึ้น

4.2.2 ควรศึกษาผลของความทนทานต่อการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางธรรมชาติที่ผสมเส้นใยกระดาษที่เหลือใช้ในสำนักงาน และยางธรรมชาติอีพอกไซ์ที่ผสมเส้นใยกระดาษที่เหลือใช้ในสำนักงานเพิ่มเติม เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับลักษณะของความทนทานต่อการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนเมื่อนำไปใช้งานจริง



## บรรณานุกรม

- กนกวรรณ หัตถิยา. 2549. ผลของการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์. สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ปัตตานี.
- กิติกร สโมสร. 2560. สมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบในล่อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Doctoral dissertation, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะ วิศวกรรมศาสตร์. สาขา วิชา วิศวกรรม วัสดุ.).
- นิธินาถ แซ่ตั้ง. 2557. ยางธรรมชาติ: การประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นทดแทนวัตถุดิบจากปิโตรเคมี รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ปราณี ปัญญาชีพ. 2544. ยางธรรมชาติอิพอกไซด์. มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ
- พงษ์ธร แซ่อ้อย. 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ
- วัชรินทร์ สายน้ำใส. 2545. เอกสารรีเอกทีฟเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับแป้งมันสำปะหลัง. สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ปัตตานี.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2551. การนำกระดาษหนังสือพิมพ์ผสมยางธรรมชาติทำผลิตภัณฑ์ยางใหม่. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2558. อุตสาหกรรมกระดาษในยุคดิจิทัล. แหล่งที่มา: <https://www.tcijthai.com/news/2015/12/watch/5288>, 4 ตุลาคม 2561
- Arroyo, M., López-Manchado, M. A., Valentin, J. L. and Carretero, J. 2007. Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blends. *Composite Science and Technology* 67: 1330-1339
- Baker, C.S.L. Gelling, LR. Neweel, R 1985. *Rubber Chemistry and Technology* 58.
- De, Debasish, De, Debapriya, Adhikari, Basudam. 2004. The effect of grass fibre filler on curing characteristics and mechanical properties of natural rubber. *Polymer Advance and Technology* 15:708-715.
- Ismail H., Rozman, H. D., Jaffri, R. M., Ishak, Zb Ab Mohd. 1997. Oil palm wood flour reinforced epoxidized natural rubber composites : the effect of filler content and size. *European Polymer Journal* 33:1627-1632.
- Nashar D. E. El., Abd-El-Messieh S.L and Basta A.H. 2004. Newsprint paper waste as a filler reinforcement in rubber composites. *Journal of Polymer Science* 91: 3410-3420.
- Salaeh, S., and Nakason, C. 2012. Influence of modified natural rubber and structure of carbon black on properties of natural rubber compounds. *Polymer Composite* 33:489-500.