



## รายงานการวิจัย

# การเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Preparation of Natural Rubber/Sisal Fiber Composites)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

# การเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Preparation of Natural Rubber/Sisal Fiber Composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร  
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ ศุภกาญจน์  
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552-2553  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2555

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์นี้ ได้รับ  
ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552-2553

งานวิจัยนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและสนับสนุนจากหลายบุคคล ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ  
ผู้ช่วยวิจัย คือ นายวิทวัส วงษ์โสรัจ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน  
(องค์การมหาชน) ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

(หัวหน้าโครงการวิจัย)

มิถุนายน 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทคัดย่อภาษาไทย

ในการศึกษานี้ เส้นใยปานสรนารายณ์ถูกใช้ในการเสริมแรงยางธรรมชาติ ปริมาณเส้นใยคือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ คอมโพสิทระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์กับยางธรรมชาติถูกเตรียมโดยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ชิ้นงานสำหรับทดสอบถูกเตรียมโดยเครื่องกดอัด สมบัติทางกล สัณฐานวิทยา และสมบัติการคงรูปของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์กับยางธรรมชาติถูกตรวจสอบ การทำอัลคาไลน์เซชันและการใส่สารช่วยให้เข้ากัน (ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์) ถูกใช้ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเตรียมโดยเครื่องบดผสมภายในอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีถูกใช้เพื่อยืนยันการกราฟท์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ และการไทเทรตถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการกราฟท์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าการทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งของยางคอมโพสิทที่ใส่เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรและเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย ในขณะที่ค่าการทนทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัวก่อนขาดมีค่าลดลง เวลาการคงรูปของยางคอมโพสิทมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย แต่ปริมาณของเส้นใยไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการสกอร์ช

คอมโพสิทระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ที่มีการทำอัลคาไลน์เซชันกับยางธรรมชาติ แสดงสมบัติทางกลที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ที่ไม่มีการดัดแปรกับยางธรรมชาติที่ทุกปริมาณเส้นใย แต่อย่างไรก็ตาม เวลาการคงรูปและเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ที่มีการทำอัลคาไลน์เซชันกับยางธรรมชาติและคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ที่ไม่มีการปรับปรุงกับยางธรรมชาติพบว่ามีค่าไม่ต่างกันมาก การใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงสมบัติทางกลของยางคอมโพสิท การเพิ่มขึ้นของเวลาการสกอร์ช และเวลาคงรูปของยางคอมโพสิทถูกพบเมื่อใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทำอัลคาไลน์เซชันและการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ให้การปรับปรุงสมบัติทางกลของยางคอมโพสิทที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

นอกจากนี้ ผลของเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อสมบัติของยางคอมโพสิทถูกศึกษา สมบัติทางกลของคอมโพสิทไฮบริดเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยปอแก้วในยางคอมโพสิท

## Abstract

In this study, sisal fiber was used to reinforce natural rubber (NR). Fiber loadings were 10, 20, and 30 phr. Sisal fiber/NR composites were prepared using a two-roll mill. The specimens were molded using a compression molding machine. Mechanical properties, morphology, and cure characteristics of the sisal fiber/NR composites were investigated. Fiber alkalization and addition of compatibilizer (natural rubber grafted with maleic anhydride, NR-g-MA) were used to enhance the compatibility between the fiber and the NR.

NR-g-MA was prepared using an internal mixer. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was used to confirm the MA grafted onto NR molecule and a titration method was used to determine the level of MA grafted onto the NR molecule.

Modulus at 100% strain (M100), modulus at 300% strain (M300), tear strength, and hardness of NR composites filled with untreated and alkali treated fibers increased with increasing fiber loading whereas tensile strength and elongation at break decreased. Cure time of the NR composites decreased with increasing fiber loading but scorch time was not much affected by fiber loading.

Alkali treated sisal fiber/NR composites exhibited higher mechanical properties compared with untreated sisal fiber/NR composites at all fiber loadings. However, cure time and scorch time of the untreated sisal fiber/NR composites and the alkali treated sisal fiber/NR composites were not much different. Addition of NR-g-MA improved the mechanical properties of the sisal fiber/NR composites. The prolonged scorch time and cure time of the NR composites were observed with the presence of NR-g-MA. In comparison between alkalization and addition of NR-g-MA, NR-g-MA provided more effective improvement in the mechanical properties of the NR composites.

In addition, the effect of sisal/rossells hybrid fiber on the properties of the NR composite was studied. Mechanical properties of hybrid composites were increased with increasing rossells fiber content in the NR composites.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	3
บทที่ 2 ภูมิหลัง	
2.1 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	4
2.1.1 การตัดแปรพื้นผิวของเส้นใย .....	4
2.1.2 การตัดแปรเมทริกซ์ .....	9
2.1.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	9
2.2 สมบัติของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	10
2.2.1 ผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและ และยางธรรมชาติ.....	10
2.2.2 ผลของการทำไซลาไนเซชันต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลของ คอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	12
2.2.3 ผลของสารเชื่อม (bonding agent) ต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติ ทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนต่อลักษณะการบวมตัวและสมบัติทางกล ของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	13
2.2.5 ผลของการดัดแปรเมทริกซ์ต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลของ คอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	13
2.2.6 ผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลของ คอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ .....	14
2.3 ผลของการใส่เส้นใยสองชนิดต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลของยาง คอมโพสิท.....	16
<b>บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง</b>	
3.1 วัสดุ .....	18
3.2 การทดลอง.....	18
3.2.1 การเตรียมเส้นใยป่านศรนารายณ์.....	18
3.2.2 การเตรียมสารช่วยให้เข้ากัน .....	18
3.2.3 การเตรียมและการขึ้นรูปคอมโพสิท.....	18
3.2.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบยางธรรมชาติและคอมโพสิท ของยางธรรมชาติ.....	19
<b>บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลของการทำอัลคาไลน์เซชัน และปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิท ระหว่างป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ.....	22
4.1.1 สมบัติการคงรูป .....	22
4.1.2 สมบัติทางกล .....	25
4.1.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	32
4.2 ผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากันและปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิท ระหว่างป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ .....	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การวิเคราะห์เชิงธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ .....	34
4.2.2 สมบัติการคงรูป .....	35
4.2.3 สมบัติทางกล .....	38
4.2.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	43
4.3 ผลของการใส่เส้นใยสองชนิดต่อสมบัติของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ.....	44
4.3.1 สมบัติการคงรูป .....	44
4.3.2 สมบัติทางกล .....	46
4.3.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	51
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	53
บรรณานุกรม .....	54
ประวัติผู้วิจัย .....	57



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 สูตรคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา .....	19
4.1 สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปร และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ .....	23
4.2 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปร และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ .....	28
4.3 สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติ คอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ .....	36
4.4 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ คอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ .....	39
4.5 สมบัติการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณเส้นใยปานศรณารายณ์ และเส้นใยปอแก้วต่างๆ .....	45
4.6 สมบัติทางกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณเส้นใยปานศรณารายณ์ และเส้นใยปอแก้วต่างๆ .....	47

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
4.1 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กสูงสุดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	24
4.2 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	24
4.3 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	25
4.4 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	25
4.5 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน.....	29
4.6 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	29
4.7 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	30
4.8 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าการยึดตัวก่อนขาดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	30
4.9 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	31
4.10 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความแข็งของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน .....	32
4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 40x ของคอมโพสิต (a) NR/10UT, (b) NR/20UT, และ (c) NR/30UT.....	33
4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 40x ของคอมโพสิต (a) NR/10AT, (b) NR/20AT, และ (c) NR/30AT.....	34
4.13 สเปกตรัมของยางธรรมชาติ (a) และยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (b)....	35
4.14 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กสูงสุดของคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน .....	36

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.15 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	37
4.16 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการสกรอชของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	37
4.17 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการคงรูปของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	38
4.18 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าคามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	40
4.19 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าคามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	40
4.20 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน .....	41
4.21 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าการยืดตัวก่อนขาดของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน .....	41
4.22 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน .....	42
4.23 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความแข็งของคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมโพลีเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน.....	43
4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 40x ของคอมโพลีเมอร์ (a) NR/10UT/5NR-g-MA, (b) NR/20UT/5NR-g-MA, และ (c) NR/30UT/5NR-g-MA	44
4.25 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพลีเมอร์.....	45
4.26 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อเวลาการสกรอช และเวลาการคงรูปของคอมโพลีเมอร์.....	46
4.27 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าคามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและค่าคามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพลีเมอร์.....	48

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.28 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อ ค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิต .....	48
4.29 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อ ค่าการยึดตัวก่อนขาดของคอมโพสิต.....	49
4.30 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อ ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิต.....	50
4.31 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อ ค่าความแข็งของคอมโพสิต.....	51
4.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 20x ของคอมโพสิตของ ยางธรรมชาติ (a) 2 Rossells – 8 Sisal, (b) 5 Rossells – 5 Sisal, และ (c) 8 Rossells – 2 Sisal .....	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ยางธรรมชาติหรือยางพาราจัดเป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่มีบทบาทและความสำคัญมาก ตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มทวีความสำคัญขึ้นเป็นลำดับตาม ความต้องการใช้ยางธรรมชาติในตลาดโลกที่มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออก ยางธรรมชาติอันดับต้นๆ ของโลก โดยที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณยางที่ผลิตได้ ส่งออกในรูปยาง ดิบ อีก 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้ภายในประเทศเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยต้องนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปจากต่างประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมากๆ ทั้งที่เป็นประเทศ ผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติอันดับต้นๆ ของโลก และผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปที่นำเข้านั้นล้วนแต่ ผลิตจากวัตถุดิบที่ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออก ดังนั้นการพัฒนาอุตสาหกรรมยางธรรมชาติแปรรูปขึ้น สูง เพื่อรองรับผลผลิตที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้ามากขึ้นกว่าใน ปัจจุบันและสามารถขยายไปสู่การทำธุรกิจยางครบวงจรในอนาคต จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ทำให้ ความสนใจ

นอกจากยางธรรมชาติแล้ว สินค้าเกษตรที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย คือ เส้นใย ธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติในประเทศไทยนอกเหนือจากการ ส่งออกในรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีน้อยมาก ในขณะที่ด้วยกันต่างประเทศซึ่งมีความตื่นตัวและให้ ความสนใจกับปัญหาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ได้มีความพยายามในการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นสาร เสริมแรงด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การใช้เส้นใย ธรรมชาติเป็นสารเสริมแรงมีข้อดีต่างๆ เช่น เส้นใยธรรมชาติสามารถปลูกทดแทนได้ ราคาถูก หาได้ ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ย่อยสลายได้ในระบบชีวภาพ มีความแข็งแรงเฉพาะ (specific strength) ที่สูง และไม่อันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพคนงาน เส้นใยธรรมชาติที่มีการศึกษาวิจัย เช่น เส้นใยจาก ปอควินา (kenaf) ปอกระเจา (jute) ปอแก้ว (rosells) ปอลินิน (flax) กัญชง (hemp) ป่านศรนารายณ์ (sisal) ฝ้าย (cotton) ไม้ไผ่ (bamboo) หญ้าแฝก (vetiver grass) ตีนกล้วย (banana bast) ปาล์ม (palm) กาบมะพร้าว (coir) เป็นต้น ซึ่งเส้นใยเหล่านี้บางชนิดสามารถหาได้ในพื้นที่ต่างๆ ของประเทศไทย แล้วแต่ประเภทและพันธุ์ ดังนั้น แนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยธรรมชาติในประเทศไทย คือ การนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นการนำเอาสมบัติที่ดีของเส้นใย ธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเส้นใยธรรมชาติอีกทางหนึ่ง

เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นด้านความเหนียว และมีพื้นที่เพาะปลูกส่วนหนึ่งอยู่ที่อำเภอคำชะอี จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันพื้นที่ปลูก

ปานสรณารายณ์ลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกษตรกรประสบกับปัญหาผลผลิตราคาตกต่ำ การขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยว รวมทั้งการเปลี่ยนไปปลูกพืชชนิดอื่นๆ ที่เกษตรกรเห็นว่าง่ายและมีรายได้มากกว่า การนำเส้นใยธรรมชาติชนิดนี้มาใช้เป็นสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต จะเป็นการเพิ่มขึ้นของรายได้ในภาคเกษตรกรรม ทั้งในรูปของการเพิ่มตลาดและการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตผลทางเกษตร

ในปัจจุบันการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งในด้านการประยุกต์ใช้งานและการวิจัยพัฒนา เนื่องจากการรวมกันของสมบัติความยืดหยุ่นและนุ่มของยางกับความแข็งแรงของเส้นใย ข้อดีต่างๆ ของยางที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย เช่น การมีค่าความแข็งตึง (stiffness) และ ค่าการกระจายพลังงาน (damping) ที่ดี ค่าใช้จ่ายในกระบวนการขึ้นรูปไม่สูง ขึ้นรูปได้ง่าย ในขณะนี้งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยปอ เส้นใยปานสรณารายณ์ เส้นใยสับปะรด เส้นใยปาล์ม มีมากขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ในการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ นอกจากเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลของยางธรรมชาติแล้ว ยังมีผลต่อการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุจากธรรมชาติ โดยเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เป็นการลดต้นทุนในการผลิตแก่ภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากราคาของเส้นใยธรรมชาติต่ำกว่าของเส้นใยประดิษฐ์ นอกจากนี้เป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะพลาสติก ประหยัดพลังงาน และเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนที่เน้นการใช้ประโยชน์จากผลิตผลทางการเกษตรของประเทศ

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยปานสรณารายณ์ชนิดสั้น โดยศึกษาผลของปริมาณของเส้นใย ผลของการตัดแปรเส้นใย (fiber treatment) และผลของสารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) ต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูป (cure characteristics) ของยางคอมโพสิต นอกจากนี้ก็ศึกษาผลของการใช้เส้นใยสองชนิด (hybrid fibers) ต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของยางคอมโพสิต การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตตามแนวทางการวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงความแข็งแรงของยางธรรมชาติและเป็นการสนับสนุนให้มีการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศในปริมาณที่สูงขึ้นด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อให้ทราบถึงผลของปริมาณเส้นใยต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสรณารายณ์และยางธรรมชาติ

2. เพื่อให้ทราบถึงผลของการดัดแปรเส้นใยต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ

3. เพื่อให้ทราบถึงผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ

4. เพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้เส้นใยสองชนิด (hybrid fibers) ต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เปรียบเทียบสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตที่ปริมาณของเส้นใยต่างๆ
2. เปรียบเทียบสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตที่มีและไม่มีสารปรับเปลี่ยนอินเทอร์เฟซด้วยวิธีการดัดแปรเส้นใย และการใส่สารช่วยให้เข้ากัน
3. ศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยสองชนิดและเปรียบเทียบสมบัติกับคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยชนิดเดียว เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยคงที่

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ยางคอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การใช้งานจริง
2. เป็นองค์ความรู้สำหรับการวิจัยขั้นถัดไป ในด้านการพัฒนาคอมโพสิตโดยใช้ผลผลิตทางการเกษตร
3. เป็นการเพิ่มประโยชน์การใช้งานและมูลค่าให้กับยางธรรมชาติและป่านศรนารายณ์
4. เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองภายในประเทศจากการผลิตคอมโพสิตโดยใช้วัตถุดิบจากทรัพยากรภายในประเทศ
5. เป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
6. ได้เอกสารวิชาการที่ตีพิมพ์ระดับประเทศและ/หรือระดับนานาชาติ
7. เป็นการส่งเสริมและพัฒนาแก่นักวิจัยรุ่นใหม่

## บทที่ 2

### ภูมิหลัง

ยางคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส (lignocellulosic filler) ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีน้ำหนักเฉพาะ (specific weight) ที่ต่ำ และมีราคาถูก ข้อดีของสารตัวเติมเซลลูโลสได้แก่ ราคาถูก ไม่อันตรายต่อเครื่องจักร มีความแข็งแรงเฉพาะที่รับได้ สามารถย่อยสลายได้ในระบบชีวภาพ และสามารถปลูกทดแทนได้ แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญในการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส คือความไม่เข้ากันของยางธรรมชาติและสารตัวเติมเซลลูโลส เนื่องจากสารตัวเติมเซลลูโลสมีความเป็นขี้ที่เด่น ส่วนยางธรรมชาติมีความเป็นขี้ที่ต่ำ ส่งผลต่อความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลส ทำให้การยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ต่ำ ซึ่งทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตต่ำ การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลส สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลส การดัดแปรเมทริกซ์ และการใส่สารช่วยให้อัดเข้ากันได้ นอกจากนี้การใส่สารตัวเติมเซลลูโลสชนิดที่สองหรือมากกว่าสองชนิด จะสามารถช่วยปรับสมบัติทางกลของคอมโพสิตได้เนื่องจากสารตัวเติมเซลลูโลสแต่ละชนิดมีสมบัติทางกลที่ต่างกัน

#### 2.1 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

##### 2.1.1 การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใย (fiber treatment)

การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น การดัดแปรทางเคมี และการดัดแปรทางกายภาพ โดยแต่ละวิธีให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ต่างกันออกไป

##### 2.1.1.1 การดัดแปรทางเคมี (chemical method)

##### 2.1.1.1.1 การทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization)

การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา การทำอัลคาไลน์เซชันเป็นวิธีที่สามารถทำความสะอาดพื้นผิวของเส้นใย และดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยให้มีการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เพิ่มขึ้นได้ Bisanda [Bisanda, 2000] ได้ทำการศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อการยึดติดของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับอียพอกซี พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ได้ เนื่องมาจากการเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของเส้นใยและการเพิ่มแรงดึงผิวของเส้นใย นอกจากนี้ การทำอัลคาไลน์เซชันยังเป็นการกำจัดลิกนิน



(lignin) และสารพวกขี้ผึ้ง (wax) ออกจากพื้นผิวของเส้นใยด้วย ทำให้เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล (mechanical interlocking) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ส่งผลให้คอมโพสิตมีค่าความทนทานต่อแรงกด (compressive strength) ดีขึ้น

Ray และคณะ [Ray et al., 2002] ดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง โดยผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่าเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวที่ลดลงเมื่อเวลาการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกกำจัดได้ด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน

Sydenstricker และคณะ [Sydenstricker et al., 2003] ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นใยป่านสรนารายณ์และปริมาณของลิกนินลดลง จากผลการทดสอบทางความร้อนยังพบอีกว่าเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีความสามารถในการทนต่อความร้อนดีกว่าเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

Lopattananon และคณะ [Lopattananon et al., 2006] ทำการดัดแปรเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (infrared spectroscopy) พบว่าหลังจากการทำอัลคาไลน์เซชันพีคของลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1436\text{ cm}^{-1}$  ลดลง ส่วนพีคของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1254\text{ cm}^{-1}$  ได้หายไป เนื่องมาจากการทำอัลคาไลน์เซชันเป็นการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยได้หมด และยังคงกำจัดลิกนินบางส่วนออกไปจากเส้นใย จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา พบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการแยกตัวของเส้นใย เนื่องมาจากการที่ลิกนินบางส่วน และเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ดังนั้นประสิทธิภาพของพื้นที่ผิวของเส้นใยที่สามารถยึดติดกับเมทริกซ์จึงมีเพิ่มมากขึ้น

Mwaikambo และ Ansell [Mwaikambo and Ansell, 2006] ได้ศึกษาลักษณะของเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.03 0.08 0.16 และ 0.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระ และมีช่องว่างระหว่างเซลล์ของเส้นใย พื้นที่ผิวที่ขรุขระนี้สามารถเพิ่มและปรับปรุงการจัดเรียงตัวของส่วนที่สามารถเกิดผลึกได้ และจากการทดสอบสมบัติการทนทานต่อแรงดึง (tensile properties) พบว่าค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) และค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของเส้นใยขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างภายในเส้นใย เช่น ปริมาณเซลลูโลส มุมการจัดเรียงตัวของ

เส้นใย และปริมาณการเกิดผลึก ในการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้ค่ามอดูลัสของยังค์ และค่าความทนทานต่อแรงดึงที่เหมาะสมคือ 0.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Mohd Edeerozey และคณะ [Mohd Edeerozey et al., 2007] นำเส้นใยปอควิมามาทำการตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีในการกำจัดสิ่งเจือปนที่พื้นผิวของเส้นใย พื้นผิวของเส้นใยสะอาดที่สุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่ได้ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่ดีที่สุด เนื่องจากจากตัวเส้นใยเกิดความเสียหาย โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของเส้นใยสูงที่สุดคือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] ทำการตัดแปรเส้นใยปอบิด (isora fiber) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยพบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยกว้างขึ้น เนื่องมาจากการกำจัดครดไขมันและลิกนินออกจากพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ และสมบัติทางกลของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 2.1.1.1.2 การทำไซลาในเซชัน (silanization)

ตัวเชื่อมประสานไซเลน (silane coupling agent) เป็นสารประกอบมีขั้วที่มีหมู่ซิลิกอนในโครงสร้าง ด้านหนึ่งของตัวเชื่อมประสานไซเลนจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ และอีกด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยให้เส้นใยและเมทริกซ์สามารถเข้ากันได้ดีขึ้น Gonzalez และคณะ [Gonzalez et al., 1999] ทำการตัดแปรเส้นใยอานหางจระเข้ (agave fourcroydes) ด้วยไซเลนชนิดไวนิลดีส (2-เมทอกซี-เอทอกซี) (vinyltris (2-methoxy-ethoxy)) 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นใยถูกแช่ในสารละลายไซเลนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดสอบอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนแสดงพีคใหม่ที่ตำแหน่งของเลขคลื่นที่ 700 1030 1145 และ 1187  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของพันธะ -Si-O-C- ส่วนพีคที่เลขคลื่น 965 และ 1200  $\text{cm}^{-1}$  เป็นพีคของพันธะ -Si-O-C- ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวเชื่อมประสานไซเลนกับตัวเส้นใย จากผลการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงพบว่าคอมโพสิตของเส้นใย

ที่ผ่านการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าคอมโพสิตของเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลน

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] นำเส้นใยใฝ่มาทำการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิดบิส(ไตรเอทอกซีไซลิลโพรพิล)เตตระซัลไฟด์ (bis(triethoxysilyl propyl) tetra sulphide) ปริมาณ 3 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ จากผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิตของเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ ในขณะที่คอมโพสิตของเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ที่น้อยกว่า และมีเมทริกซ์บางส่วนติดกับเส้นใย แสดงให้เห็นถึงแรงยึดติดที่ดีขึ้นระหว่างพื้นผิวของเส้นใยและเมทริกซ์ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น

Pothan และคณะ [Pothan et al., 2006] ทำการปรับปรุงการยึดติดโดยการตัดแปรทางเคมีของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกล้วยและพอลิเอสเตอร์ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิดอัลฟา-เมทราไครอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน ( $\gamma$ -methacryloxypropyl trimethoxy silane) ปริมาณ 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) พบว่าค่าไดนามิกส้อมดูล์สของคอมโพสิตที่ผ่านการตัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลน

Abdelmouleh และคณะ [Abdelmouleh et al., 2007] ศึกษาผลของชนิดตัวเชื่อมประสานไซเลนต่อสมบัติทางกลและความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยไม้สน และยางธรรมชาติ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลน 3 ชนิด ได้แก่อัลฟา-เมทราไครอกซีโพรพิลไตรเมทอกซี ( $\gamma$ -methacryloxypropyltrimethoxy, MPS) อัลฟา-เมอแคปโทโพรพิลไตรเมทอกซี ( $\gamma$ -mercaptopropyltrimethoxy, MRPS) และเฮกซะดีซิลไตรเมทอกซีไซเลน(hexadecyltrimethoxy-silanes, HDS) ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าคอมโพสิตที่ใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลน MPS และคอมโพสิตที่ใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิด MRPS ให้สมบัติทางกลที่ดีเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ได้ จากผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิต พบว่าชนิดของตัวเชื่อมประสานไซเลนไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิต

#### 2.1.1.2 การตัดแปรทางกายภาพ (physical method)

##### 2.1.1.2.1 การตัดแปรด้วยความร้อน (heat treatment)

การให้ความร้อนแก่เส้นใยธรรมชาติในระดับที่สูงกว่าอุณหภูมิการอบแห้งปกติสามารถลดปริมาณการดูดความชื้น และทำให้เส้นใยหดตัวลงไปจากเดิม การตัดแปร

ด้วยความร้อนทำให้ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และการดูดความชื้นของเส้นใยไม้ลดลง ในขณะที่การเกิดผลึกของเส้นใยเพิ่มขึ้น Rusche [Rusche, 1973] ศึกษาสมบัติความแข็งแรง (strength properties) ของเส้นใยไม้หลังจากทำการตัดแปรด้วยความร้อน โดยเส้นใยไม้ถูกนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าความแข็งแรง (strength) ของเส้นใยจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการสลายตัวทางความร้อน ส่วนค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus) ของเส้นใยมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสหลังจากเส้นใยผ่านการตัดแปรด้วยความร้อน

Hakkou และคณะ [Hakkou et al., 2005] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการเวท (wettability) ของเส้นใยไม้ระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อน โดยเส้นใยถูกนำไปอบที่อุณหภูมิต่างกันระหว่าง 20 ถึง 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าการตัดแปรด้วยความร้อนทำให้พีกคาร์บอนิล (carbonyl peak) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1730 \text{ cm}^{-1}$  มีการลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และพบว่าเส้นใยไม้มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) หลังจากทำการตัดแปรโดยใช้ความร้อนในช่วง 130 ถึง 160 องศาเซลเซียส

Saikia [Saikia, 2008] รายงานผลของการตัดแปรโดยใช้ความร้อนต่อลักษณะโครงสร้างของเส้นใยป่านศรนารายณ์ จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) และอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ประกอบไปด้วยโครงสร้างของเซลลูโลส โครงสร้างของเซลลูโลสนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งให้ความร้อนถึง 177 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ช่วงเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 37 ถึง 487 องศาเซลเซียส ช่วงแรกอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 37 ถึง 107 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่น้ำถูกกำจัดออกไป ช่วงที่สองเป็นช่วงที่องค์ประกอบภายในเส้นใยเริ่มมีการสลายตัวเมื่อให้อุณหภูมิเกิน 227 องศาเซลเซียสขึ้นไป และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่องค์ประกอบคาร์บอนภายในโครงสร้างของเส้นใยถูกเผาไหม้

#### 2.1.1.2.2 การตัดแปรโดยใช้โคโรนา (corona treatment)

การตัดแปรเส้นใยธรรมชาติโดยใช้พลังงานโคโรนาสามารถเพิ่มพลังงานพื้นผิวอิสระขององค์ประกอบที่มีขั้วที่อยู่ภายในเส้นใยได้ โดยจะเป็นการเพิ่มปริมาณของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) Gassan และ Gutowski [Gassan and Gutowski, 2000] ปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอกระเจาและอีพอกซี โดยการตัดแปรเส้นใยปอกระเจาด้วยโคโรนา จากผลการทดสอบพบว่าพื้นผิวอิสระขององค์ประกอบมีขั้วสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มพลังงานจากแหล่งกำเนิด โดยที่สภาวะการตัดแปรที่เหมาะสมจะทำให้ค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (flexural strength) ของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์

Gassan และคณะ [Gassan et al., 2000] ศึกษาลักษณะของพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้พลังงานโคโรนา โดยพบว่าการใช้พลังงานโคโรนาจะเพิ่มความเป็นขั้วให้กับเส้นใยปอกระเจาในขณะที่องค์ประกอบที่ไม่มีขั้วยังคงมีเท่าเดิม นอกจากนี้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มของหมู่คาร์บอนิล และหมู่ไฮดรอกซิล โดยสามารถยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของความเป็นขั้วที่พื้นผิวของเส้นใย ความแข็งแรงของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอกระเจาและอีพอกซีจะลดลงเมื่อทำการตัดแปรเส้นใยโดยใช้พลังงานโคโรนาที่มากเกินไป

### 2.1.2 การตัดแปรเมทริกซ์ (matrix modification)

ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) เป็นยางที่ถูกตัดแปรมาจากยางธรรมชาติ เมื่อยางธรรมชาติถูกอีพอกซีไดซ์ สมบัติทางเคมีและทางกายภาพจะเปลี่ยนไป โดยจะขึ้นกับปริมาณโมเลกุลที่ถูกตัดแปร เมื่อระดับของการตัดแปรเพิ่มขึ้นจะทำให้ยางมีความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์สามารถเข้ากับเส้นใยธรรมชาติได้ดีกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ถูกตัดแปร Ismail และคณะ [Ismail et al., 1997] ทดสอบสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ พบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยปาล์มเพิ่มขึ้น ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และค่าความแข็ง (hardness) ของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากการกระจายตัว และการยึดติดที่ติระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2006] ศึกษาผลของ ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษ (paper sludge) และยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ให้ค่าทอร์กสูงสุด ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain) ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain) และค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติ เนื่องมาจากการยึดติดที่ติระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของเยื่อกระดาษกับหมู่อีพอกซีของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์

### 2.1.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (addition of compatibilizer)

การใส่สารช่วยให้เข้ากันลงในคอมโพสิทที่ไม่เข้ากัน สามารถช่วยให้คอมโพสิทมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น โดยสารช่วยให้เข้ากันจะเข้าไปอยู่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างการผสมและช่วยลดแรงดึงผิว ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอมโพสิทดีขึ้น Ismail และคณะ [Ismail et al., 2005] ใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (natural rubber grafted with maleic anhydride) เป็นสารช่วยให้เข้ากันในคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเตรียมในเครื่องบดผสมภายในโดยใช้อุณหภูมิ 135

องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากผลการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติพบว่าเมื่อใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในคอมโพสิตทำให้การยึดติดระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติดีขึ้น โดยจากการทดสอบสัญญาณวิทยาพบว่าการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในคอมโพสิตส่งผลให้การเกาะกลุ่มของเยื่อกระดาษ และการหลุดของเยื่อกระดาษจากยางธรรมชาติลดลง

Ismail และ Haw [Ismail and Haw, 2008] ศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน ในคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติ โดยปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีปริมาณ 6 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้คือ 5 10 15 และ 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ จากการทดสอบสัญญาณวิทยาพบว่าเส้นใยปาล์มจะหลุดออกจากเมทริกซ์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงยึดติดระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติ

Zeng และคณะ [Zeng et al., 2010] ใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยให้เข้ากัน ในคอมโพสิตระหว่างเส้นใยฝ้ายและยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเตรียมในเครื่องบดผสมภายในโดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่ายางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 และ 1860  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้กราฟท์บนยางธรรมชาติ และเมื่อทดสอบกับคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 และ 1860  $\text{cm}^{-1}$  มีการเปลี่ยนไปเป็นพีคที่เลขคลื่น 1780 และ 1856  $\text{cm}^{-1}$  เนื่องมาจากผลของการเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

## 2.2 สมบัติของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

### 2.2.1 ผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

De และคณะ [De et al., 2006] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยหญ้าและยางธรรมชาติ โดยเส้นใยหญ้าได้ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำมาผสมกับยางธรรมชาติ คอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้ค่าทอร์กสูงสุด (maximum torque) มากกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีกว่าระหว่างเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันและยางธรรมชาติ เวลาการคงรูป (cure time)

ของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใย เนื่องจากอิทธิพลของค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของเส้นใยหลังจากผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยกระบวนการคงรูปของคอมโพสิตจะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นด่าง ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน คอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีสมบัติทางกลที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติได้ จากการทดสอบมาตรฐานวิทยา พบว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีเส้นใยที่หักติดอยู่กับเมทริกซ์ที่เป็นยางธรรมชาติ เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ

Lopattananon และคณะ [Lopattananon et al., 2006] เตรียมคอมโพสิตระหว่างเส้นใยสับปะรดและยางธรรมชาติ โดยเส้นใยสับปะรดถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ และสมบัติความทนทานต่อแรงดึงได้ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้เปอร์เซ็นต์การปรับปรุงความแข็งแรงของคอมโพสิตสูงที่สุดคือ 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน การทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดลิกนินและสารประกอบพวกจี๊ซึ่งออกไปจากเส้นใยได้ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มโอกาสให้เส้นใยและยางธรรมชาติเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลและส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากการลักษณะทางมาตรฐานวิทยาของคอมโพสิต พบว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ดีซึ่งสังเกตได้จากมีส่วนของยางติดอยู่บนพื้นผิวของเส้นใย

Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] ศึกษาสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และมาตรฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปออบิดและยางธรรมชาติ เส้นใยปออบิดผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง การทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีลักษณะที่เหมาะสมในการเสริมแรง และเมื่อเทียบกับปริมาณเส้นใยเท่ากัน สมบัติทางกลของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้ค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ทำอัลคาไลน์เซชัน จากลักษณะทางมาตรฐานวิทยาของตัวเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีขนาดเล็กกลง เนื่องมาจากการหลุดไปของลิกนิน และส่วนที่เป็นกรดไขมันส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระและเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล

### 2.2.2 ผลของการทำโซลาในเซชันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] ทดสอบผลของตัวเชื่อมประสานโซเลนชนิดบิส(ไตรเอทอกซีไซลิลโพรพิล)เตตระซัลไฟด์ (bis(triethoxysilyl propyl) tetra sulphide) ต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้และยางธรรมชาติ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานโซเลนปริมาณ 3 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิทที่ใส่ตัวเชื่อมประสานโซเลนมีเวลาการสกอรัช และเวลาการคงรูปสั้นกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่ตัวเชื่อมประสานโซเลน โดยการลดลงนี้เป็นผลจากการกระจายตัวที่ดีของสารเสริมแรงในยางธรรมชาติเมื่อใส่ตัวเชื่อมประสานโซเลนเข้าไปในคอมโพสิท ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิทที่ใส่ตัวเชื่อมประสานโซเลนมีค่าสูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่ตัวเชื่อมประสานโซเลน เนื่องมาจากตัวเชื่อมประสานโซเลนเข้าไปช่วยคัดแปรพื้นผิวของตัวเส้นใย และช่วยทำให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทพบว่า การใส่ตัวเชื่อมประสานโซเลนส่งผลให้ช่องว่างที่เกิดจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ลดลง และทำให้เนื้อเมทริกซ์ยึดติดกับเส้นใยเพิ่มขึ้น

### 2.2.3 ผลของสารเชื่อม (bonding agent) ต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] รายงานผลของสารเชื่อมต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้และยางธรรมชาติ โดยสารเชื่อมประกอบไปด้วยสาร 3 ชนิด คือ ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol formaldehyde) เฮกซะเมทิลลิโนไตรเอมีน (hexamethylene tetramine) และซิลิกา (silica) ค่าเวลาการสกอรัช (scorch time) และเวลาการคงรูปของคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมมีค่าสั้นกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อม ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความหนืดของคอมโพสิท ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารเชื่อม เนื่องมาจากแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมมีการหลุดของเส้นใยออกจากเมทริกซ์น้อยมาก เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ

De และคณะ [De et al., 2006] ศึกษาผลของการใช้รีโซซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ลาเท็กซ์ (resorcinol formaldehyde latex) เป็นสารเชื่อมต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยหญ้าและยางธรรมชาติ พบว่าคอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมให้ค่าทอร์กสูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ใส่สารเชื่อม เพราะแรงยึดติดที่ดีบริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนั้น คอมโพสิทที่ใส่สารเชื่อมให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ใส่สารเชื่อมในทุกปริมาณเส้นใย เนื่องจากมีการถ่ายเทความเค้น (stress transfer) ได้อย่างมี



ประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิตที่ใส่สารเชื่อมมีเส้นใยที่หักคาอยู่ที่เมทริกซ์ เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] ศึกษาผลของสารเชื่อมต่อสมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอปิดและยางธรรมชาติโดยสารเชื่อมประกอบไปด้วยสาร 3 ชนิด คือ รีโซซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (resorcinol formaldehyde resin) เฮกซะเมทิลลินไดรเอมีน (hexamethylene tetramine) และพรีซิพิเทรทซิลิกา (precipitated silica) พบว่าการใส่สารเชื่อมเข้าไปในคอมโพสิตสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัส ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งแรงได้ เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ และจากสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตพบว่าสารเชื่อมช่วยปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ให้ดีขึ้น

#### 2.2.4 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนต่อลักษณะการบวมตัวและสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2006] รายงานผลของการตัดแปรด้วยความร้อนต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึง และลักษณะการบวมตัวของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ เส้นใยป่านศรนารายณ์ถูกนำมาถักเป็นผืน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตที่มีการตัดแปร โดยใช้ความร้อนมีค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีการตัดแปรด้วยความร้อน เนื่องมาจากทำให้ความร้อนแก่เส้นใยจนถึงอุณหภูมิที่พอเหมาะสามารถเพิ่มความสามารถในการเกิดผลึกของเส้นใยได้ การตัดแปรด้วยความร้อนส่งผลให้ความชื้นของเส้นใยลดลงและสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติได้ จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตแสดงให้เห็นว่าการตัดแปรด้วยความร้อนสามารถช่วยให้เส้นใยและยางธรรมชาติเข้ากันได้ดีขึ้น

#### 2.2.5 ผลของการตัดแปรเมทริกซ์ต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 1997] ศึกษาผลของนำยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์มาเสริมแรงด้วยผงไม้จากปาล์มน้ำมัน (oil palm wood flour) โดยยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ที่ใช้มีปริมาณของหมู่อีพ็อกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์ (ENR50) พบว่าเวลาการสกอรัชและเวลาการคงรูปลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงไม้จากปาล์มน้ำมัน โดยการลดลงของเวลาการสกอรัชและเวลาการคงรูปนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น พื้นที่ผิวของสารเสริมแรง ขนาดของสารเสริมแรง และความชื้นภายในสารเสริมแรง นอกจากนี้ ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวก่อนขาด (elongation at break) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้จากปาล์มน้ำมัน เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงไม้จากปาล์ม

น้ำมัน เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยด้วย ดังนั้นหากผงไม้จากปาล์มน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตที่มีค่าลดลง

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2006] ศึกษาผลของปริมาณเยื่อกระดาษและชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) และสมบัติความทนทานต่อแรงดึง โดยปริมาณเยื่อกระดาษที่ใช้คือ 10 20 30 และ 40 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าเวลาการสกรอชของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเยื่อกระดาษ เวลาการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเยื่อกระดาษ ในขณะที่เวลาการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเยื่อกระดาษ ค่าทอร์กยืดหยุ่นสูงสุด (maximum elastic torque) และค่าทอร์กหนืด (viscous torque) ของคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเยื่อกระดาษ อย่างไรก็ตามที่ปริมาณเยื่อกระดาษเท่ากัน คอมโพสิตของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์มีค่าทอร์กสูงสุด ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain) ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain) และค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ในขณะที่ค่าการยึดตัวก่อนขาดมีค่าน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติ เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีกว่าระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษ และหมู่อีพ็อกไซด์ของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์

Pattamaprom และคณะ [Pattamaprom et al., 2008] ศึกษาผลของการตัดแปรยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าแกลบ (rice husk ash) ยางธรรมชาติที่ตัดแปร ได้แก่ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ จากการศึกษาพบว่า คอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์และผงเถ้าแกลบแสดงค่าความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห (crosslink density) ที่สูงสุดและเวลาสกรอชสั้นที่สุด ตามด้วยคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าแกลบ และคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และผงเถ้าแกลบ เนื่องจากหมู่อีพอกซีในยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ไปกระตุ้นพันธะคู่ในโมเลกุลของยางเกิดเป็นแรดิคัล ซึ่งแรดิคัลนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและสร้างโครงสร้างร่างแหกับกำมะถัน การที่คอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และผงเถ้าแกลบมีค่าเวลาสกรอชที่ช้า อาจเนื่องมาจากความเป็นกรดของกรดมาเลอิกและอันตรกิริยาระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์และสารตัวเร่ง ค่ามอดูลัสของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์และผงเถ้าแกลบและคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และผงเถ้าแกลบมีค่าสูงกว่าของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าแกลบ

## 2.2.6 ผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

Ismail และคณะ [Ismail et al., 2005] ศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์เป็นสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ พบว่าเวลาการสกอรัชและเวลาการคงรูปของคอมโพสิทที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันมีเวลานานกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน ค่ามอดูลัสและค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากันเนื่องจากสารช่วยให้เข้ากันสามารถปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ โดยส่วนของยางธรรมชาติในยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์จะเกิดการผสมแบบเข้ากันได้กับเมทริกซ์ที่เป็นยางธรรมชาติ และส่วนที่มีขี้ของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษที่บริเวณอินเทอร์เฟส จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าการใช้สารช่วยให้เข้ากันสามารถลดการเกาะกลุ่มกันของเยื่อกระดาษ และการหลุดของเยื่อกระดาษจากเมทริกซ์ลงได้

Ismail และ Haw [Ismail and Haw, 2008] ศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์เป็นสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติทางกลของคอมโพสิทระหว่างผงปาล์ม (palm ash) และยางธรรมชาติ พบว่าการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ส่งผลให้เวลาการสกอรัช และเวลาการคงรูปลดลง เนื่องจากการยึดติดที่ดีระหว่างผงปาล์มและเมทริกซ์ นอกจากนี้ การใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ช่วยเพิ่มค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพสิท ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์จะลดลักษณะการกระจายพลังงาน (damping characteristics) ของคอมโพสิทได้ ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยึดตัวก่อนขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผงปาล์มและเมทริกซ์โดยยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่าคอมโพสิทที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์มีช่องว่างที่เกิดจากผงปาล์มที่หลุดออกจากเมทริกซ์ลดลง เนื่องจากแรงยึดติดที่แข็งแรงระหว่างผงปาล์มและยางธรรมชาติ

Zeng และคณะ [Zeng et al., 2010] ศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ต่อสมบัติทางพลวัต สมบัติทางกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยฝ้ายและยางธรรมชาติ พบว่าค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus) ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยึดตัวก่อนขาด และค่าความแข็งของคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ เนื่องจากแรงยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ จากการทดสอบทางสัณฐาน

วิทยาพบว่าเส้นใยที่ถูกดึงออกจากเมทริกซ์มีความหยابที่ผิวของเส้นใย ซึ่งสามารถบอกได้ว่ามีการยึดติดที่ีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เมื่อมีการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลือกแอนไฮไดรด์

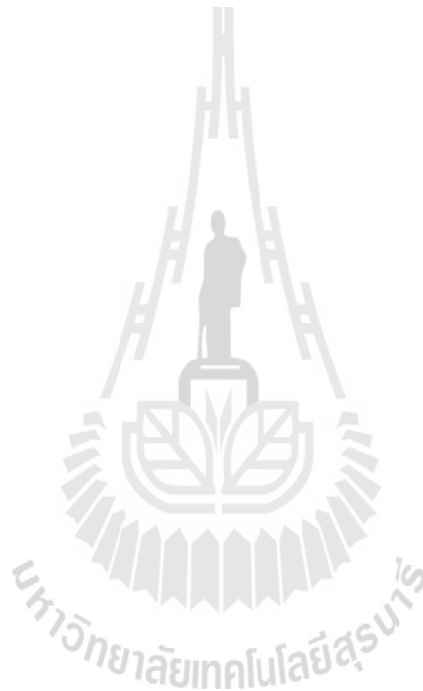
### 2.3 การใส่เส้นใยสองชนิดต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกลทางกลของยางคอมโพสิต

คอมโพสิตไฮบริด (hybrid composites) คือคอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใยสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดลงในเมทริกซ์เดียว ข้อดีของเส้นใยชนิดหนึ่งจะใช้ทดแทนข้อด้อยของเส้นใยอีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นเป็นการสมดุลของราคาและประสิทธิภาพของคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตไฮบริดขึ้นกับ ปริมาณเส้นใย ความยาวของแต่ละเส้นใย การจัดเรียงตัวของเส้นใย การยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2004] ศึกษาผลของปริมาณเส้นใย และอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยปาล์มต่อสมบัติการคงรูป และสมบัติการทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิต ระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ เส้นใยปาล์ม และยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยทั้งสองชนิด ส่งผลให้ค่าทอร์กของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของเส้นใยในยางธรรมชาติทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง จึงทำให้คอมโพสิตมีความแข็ง (rigid) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า ปริมาณของเส้นใยไม่ส่งผลต่อเวลาการคงรูปของคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยปาล์ม พบว่าที่อัตราส่วนเส้นใยปานสรนารายณ์ 21 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ และเส้นใยปาล์ม 9 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด และยังพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงขึ้นกับอัตราส่วนของปริมาณเส้นใยปานสรนารายณ์มากกว่าเส้นใยปาล์ม เนื่องจากเส้นใยปานสรนารายณ์มีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าเส้นใยปาล์ม

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2005] ศึกษาสมบัติทางกลเชิงพลวัต (dynamic mechanical properties) ของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ความยาว 10 มิลลิเมตร เส้นใยปาล์มความยาว 6 มิลลิเมตร และยางธรรมชาติ พบว่ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบแนวโน้มที่คล้ายกันกับค่ามอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยในคอมโพสิต การใส่เส้นใยลงในคอมโพสิตทำให้สมบัติการกระจายพลังงาน (damping properties) ลดลง เพราะเส้นใยจะเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนที่อย่างอิสระของโมเลกุลยางธรรมชาติ นอกจากนี้พบว่าการทำงานอัลคาไลน์เซชันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างร่างแหและการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ สมบัติการกระจายพลังงานลดลงเมื่อมีการทำอัลคาไลน์เซชัน

Jacob และคณะ [Jacob et al., 2008] ศึกษาผลของการใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปาล์มที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของยางคอมโพสิต พบว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าทอร์กสูงสุด ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซนต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวก่อนขาด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งแรงมากกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดแต่ไม่ได้ผ่านการตัดแปร เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต พบว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใย 2 ชนิดที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ ในขณะที่คอมโพสิตที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีเส้นใยที่หักและติดอยู่กับเมทริกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยทั้ง 2 ชนิดและยางธรรมชาติดีขึ้น



## บทที่ 3

### วัสดุและการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยยางธรรมชาติเกรด STR 5L จากบริษัทไทยอ้อยางพารา จำกัด เส้นใยป่านสรณารายณ์จากกลุ่มหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ของอำเภอด่านขุนทด จังหวัด นครราชสีมา มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, sigma-aldrich) ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, aldrich chemicals) เส้นใยปอแก้วจากบริษัทเอ็นอีพี อสังหาริมทรัพย์ และ อุตสาหกรรม และสารที่ใช้ในการคงรูปร่างธรรมชาติประกอบไปด้วยกรดสเตียริก (stearic acid) ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) เอ็น-ไซโคลเฮกเซน-1-เบนโซไทอะโซล-2-ซัลเฟนามิด (N-cyclohexyl-2-benzothiazole-2-sulphenamide, CBS) และกำมะถัน (sulfur)

#### 3.2 การทดลอง

##### 3.2.1 การเตรียมเส้นใยป่านสรณารายณ์

เส้นใยป่านสรณารายณ์ถูกนำมาตัดให้ได้ความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้น นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน โดยเรียกเส้นใยที่ผ่านการอบในขั้นตอนนี้ว่าเส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปร (untreated fiber, UT) ในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส และพวกลิกนินที่มีน้ำหนัก โมลต่ำออกจากเส้นใยทำโดยการนำเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำ ถูและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน เส้นใยที่ได้จากขั้นตอนนี้เรียกว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkali treated fiber, AT)

##### 3.2.2 การเตรียมสารช่วยให้เข้ากัน

ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (natural rubber grafted with maleic anhydride) ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมภายใน (internal mixer, Hakke Rheomix 3000P ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และความเร็วยรอบ 60 รอบต่อนาที ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่ใช้คือ 6 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ส่วนปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์คือ 1 ส่วนใน หนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

##### 3.2.3 การเตรียมและการขึ้นรูปคอมโพสิต

สูตรของยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 3.1 โดยคอมปาวด์ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill, Chaichareon) ที่อุณหภูมิห้อง และใช้ปริมาณ ของเส้นใยต่างกันคือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ขั้นแรกของการผสมจะ

นำยางธรรมชาติมาบดให้นิ่มเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการเติมซิงค์ออกไซด์ และเส้นใยลงไป ตามลำดับ หลังจากใส่เส้นใยเข้าไปแล้วทำการใส่สารที่ช่วยในการทำให้ยางคงรูปและเกิดโครงสร้างร่างแห คือ กรดสเตียริก CBS และกำมะถัน เวลาการผสมทั้งหมดคือ 25 นาที ขึ้นงานสำหรับทดสอบ ถูกเตรียมโดยเครื่องกดอัด (compression molding machine, Gotech, GT-7014-A30) ภายใต้แรงดัน 130 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในการศึกษาผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากัน ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกใช้ในปริมาณ 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

จากการพิจารณาสมบัติทางกล และสมบัติการคงรูปคอมโพสิตที่ปริมาณเส้นใย ต่างๆ ปริมาณเส้นใยที่ทำให้คอมโพสิตมีค่าสมบัติทางกล และสมบัติการคงรูปที่เหมาะสมที่สุด จะถูกใช้ในการศึกษาผลของการใส่เส้นใยสองชนิดลงในยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกล สมบัติการคงรูป และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต โดยปริมาณของเส้นใยปานศรณารายณ์ต่อเส้นใยปอแก้วที่ใช้ศึกษา คือ 8 ต่อ 2 5 ต่อ 5 และ 2 ต่อ 8 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

### ตารางที่ 3.1 สูตรคอมพาวด์ที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุ	ปริมาณ (ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ)			
ยางธรรมชาติ (NR)	100	100	100	100
ซิงค์ออกไซด์	5	5	5	5
กรดสเตียริก	1.5	1.5	1.5	1.5
CBS	0.5	0.5	0.5	0.5
กำมะถัน	2.5	2.5	2.5	2.5
เส้นใยปานที่ไม่ได้ปรับปรุง (UT)	-	x	-	x
เส้นใยปานที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน (AT)	-	-	x	-
ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (NR-g-MA)	-	-	-	5

หมายเหตุ x คือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

### 3.2.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบยางธรรมชาติ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

#### 3.2.4.1 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ถูกตรวจสอบโดยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR spectrometer, Bruker) โดยทำการทดสอบในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 600  $\text{cm}^{-1}$  ทำการสแกน 32 ครั้ง ที่ความละเอียดเลขคลื่น 4  $\text{cm}^{-1}$

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปียางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ผ่านการกำจัดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกแล้ว ถูกทดสอบโดยการหล่อลงบนแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr disc)

ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟท์บนยางธรรมชาติหาได้จากการไทเทรตหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic acid groups) ที่มาจากหมู่แอนไฮไดรด์ สารละลายของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ในการไทเทรตเตรียมโดยการละลาย 1 กรัมของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในโทลูอีน 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดของโทลูอีน มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาถูกแยกออกโดยการเติมอะซิโตนปริมาณมากเกินพอลงในสารละลายของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และทำการกรอง นำยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ได้จากการตกตะกอนไปทำให้แห้งในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปละลายในโทลูอีนอีกครั้ง จากนั้นเติมน้ำ 0.2 มิลลิลิตร เพื่อทำการไฮโดรไลต์หมู่แอนไฮไดรด์ไปเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ทำการรีฟลักซ์ (reflux) สารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้การเกิดไฮโดรไลซิสสมบูรณ์ ทำการไทเทรตปริมาณคาร์บอกซิลิกด้วยสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 N ในการเตรียมสารละลายใช้เมทานอลและเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายที่อัตราส่วน 1 ต่อ 9 โดยปริมาตร ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) ใช้เป็นตัวชี้วัด (indicator) ความเข้มข้นของคาร์บอกซิลิกถูกเปลี่ยนไปเป็นปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ตามสมการ 3.1 (Nakason et al., 2004)

$$MA \text{ (wt\%)} = \frac{(V_1 - V_0)}{2w} \times N \times 98 \times 100\% \quad (3.1)$$

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หน่วยเป็น โมลต่อลิตร

$V_0$  และ  $V_1$  คือ ปริมาณสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตของ blank และตัวอย่าง ตามลำดับ W คือ น้ำหนักของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ หน่วยเป็นกรัม

#### 3.2.4.2 สมบัติการคงรูป (cure characteristics)

สมบัติการคงรูปประกอบด้วย ทอร์คสูงสุด (MH) ทอร์คต่ำสุด (ML) เวลาการสกอรัช ( $t_s$ ) และเวลาการคงรูป ( $t_{90}$ ) โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR, Gotech, GT-M200F) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

#### 3.2.4.3 สมบัติทางกล (mechanical properties)

สมบัติด้านความทนทานต่อแรงดึง (tensile properties) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, 5565) ขนาดของเซลล์รับแรง 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ความยาวของเกจ 33 เซนติเมตร

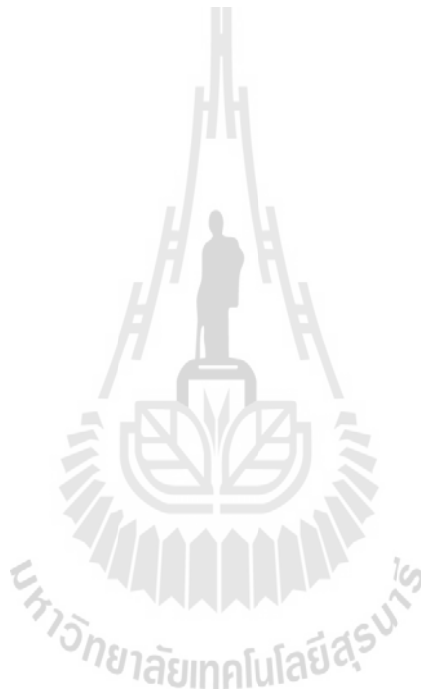


สมบัติด้านความทนทานต่อการฉีกขาด (tear properties) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, 5565) ขนาดของเซลล์รับแรง 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที

สมบัติด้านความแข็ง (hardness) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้เครื่อง international rubber hardness degrees tester, Bai Eiss, Digi Test)

#### 3.2.4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

การตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา ทำโดยใช้เครื่อง scanning electron microscope, Jeol, JSM-6400) การเตรียมตัวอย่างทำโดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงไปทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปศึกษา



## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการตัดแปรพื้นผิวของเส้นใยป่านสรนารายณ์โดยการทำอัลคาไลน์เซชัน และการใส่สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์และยางธรรมชาติ และผลของปริมาณของเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ปริมาณ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ (part per hundred of rubber, phr) นอกจากนี้ มีการศึกษาผลของใส่เส้นใยสองชนิด (hybrid fibers) คือเส้นใยป่านสรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้ว ต่อสมบัติการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์ เส้นใยปอแก้วและยางธรรมชาติ

#### 4.1 ผลของการทำอัลคาไลน์เซชัน และปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิตระหว่างป่านสรนารายณ์และยางธรรมชาติ

##### 4.1.1 สมบัติการคงรูป

จากการทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยเครื่อง MDR ค่าทอร์กสูงสุด (MH) ที่ได้เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งของยาง ในขณะที่ค่าทอร์กต่ำสุด (ML) จะบอกถึงความหนืดเริ่มต้นของยางคอมพาวด์ ค่าทอร์กสูงสุด ค่าทอร์กต่ำสุด เวลาการสกอรัช ( $t_{s1}$ ) และเวลาการคงรูป ( $t_{90}$ ) ของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุดเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความแข็งของคอมโพสิต และการลดลงของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของยางธรรมชาติ Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] พบเช่นกันว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุดของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอบิด (isora fiber) และยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น

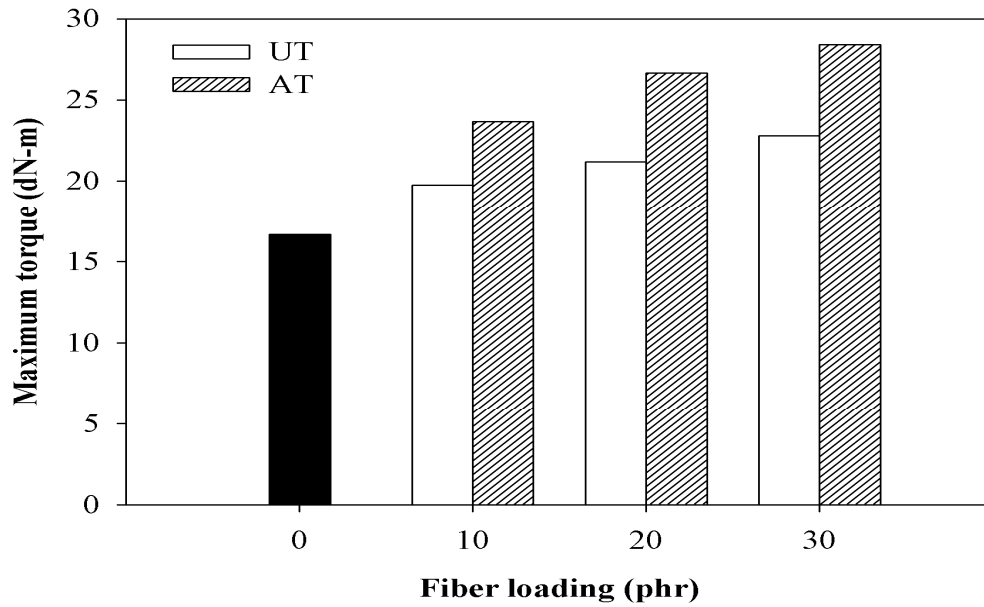
จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณของเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรไม่ได้ส่งผลต่อค่าเวลาการสกอรัชของคอมโพสิต นอกจากนี้ Ismail และคณะ [Ismail et al., 2002] และ Lopattananon และคณะ [Lopattananon et al., 2006] พบผลที่คล้ายกันเมื่อทดสอบกับคอมโพสิตระหว่างเส้นใยไผ่และยางธรรมชาติ และคอมโพสิตระหว่างเส้นใยสับปะรดและยางธรรมชาติตามลำดับ เวลาการคงรูปของคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยทั่วไปแล้วสมบัติการคงรูปของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเสริมแรง เช่น พื้นที่ผิว ขนาดของสารเสริมแรง ความชื้น และปริมาณของโลหะออกไซด์ [Ismail et al., 1997]

เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันในคอมโพสิตพบว่า มีผลที่คล้ายกันกับการเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรร โดยค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุดจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเวลาการสกอรัช และค่าเวลาการคงรูปมีค่าลดลง

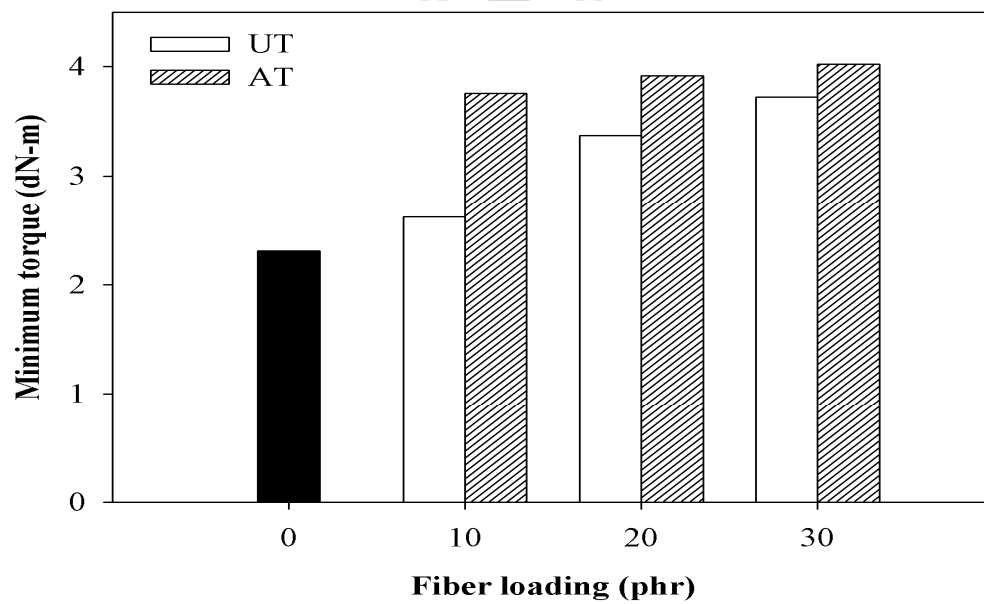
เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน พบว่าคอมโพสิตของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้ค่าทอร์กสูงสุด และทอร์กต่ำสุดที่สูงกว่าคอมโพสิตของเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เมื่อเส้นใยถูกตัดแปรรโดยการทำอัลคาไลน์เซชัน เฮมิเซลลูโลส สารพวกจีฟังก์ และสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระเพิ่มขึ้น เป็นการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อนันท์ทางกล (mechanical interlocking) โดย Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] รายงานผลที่คล้ายกันเมื่อศึกษาคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอปิดและยางธรรมชาติ การทำอัลคาไลน์เซชันไม่ได้ส่งผลต่อค่าเวลาการสกอรัช และค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิตดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม De และคณะ [De et al., 2006] พบว่าค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยหญ้าที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าน้อยกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยหญ้าที่ไม่ได้ตัดแปรร เนื่องมาจากค่า pH ของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าเท่ากับ 8.1 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปจะเร็วขึ้นเมื่ออยู่ในค่า pH ที่เป็นด่าง แต่ในการศึกษานี้ หลังจากเส้นใยผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันจะถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เท่ากับ 7 ดังนั้นการทำอัลคาไลน์เซชันจึงไม่ส่งผลต่อค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิต

**ตารางที่ 4.1** สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรร และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ

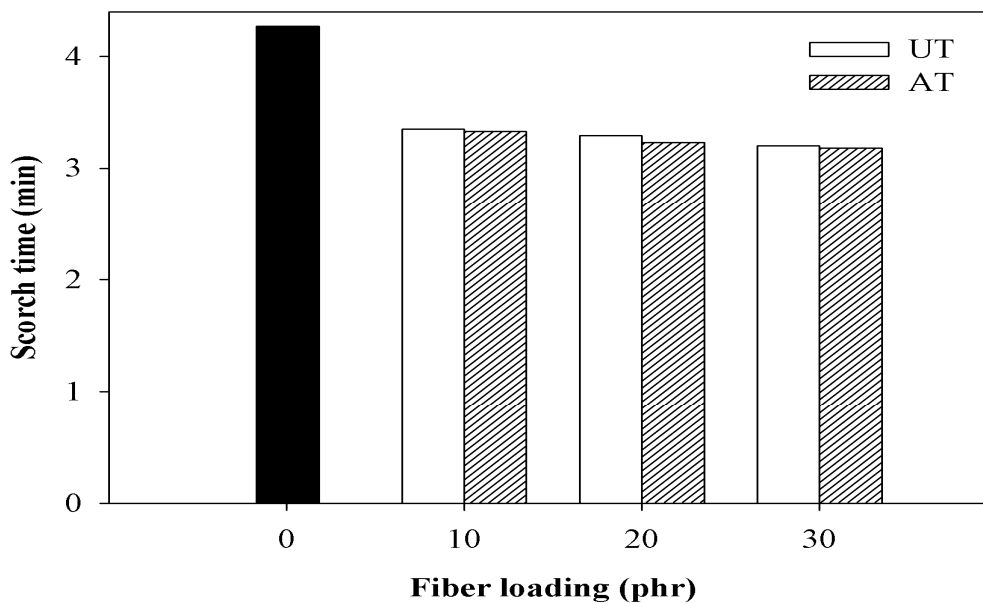
Formulation	MH (dN-m)	ML (dN-m)	Time (min)	
			t <sub>s1</sub>	t <sub>90</sub>
NR	16.662	2.310	4.27	7.54
NR/10 UT	19.741	2.620	3.35	7.16
NR/20 UT	21.170	3.373	3.29	6.33
NR/30 UT	22.790	3.722	3.20	6.02
NR/10 AT	23.650	3.757	3.33	7.08
NR/20 AT	26.641	3.919	3.23	6.21
NR/30 AT	28.410	4.022	3.18	5.93



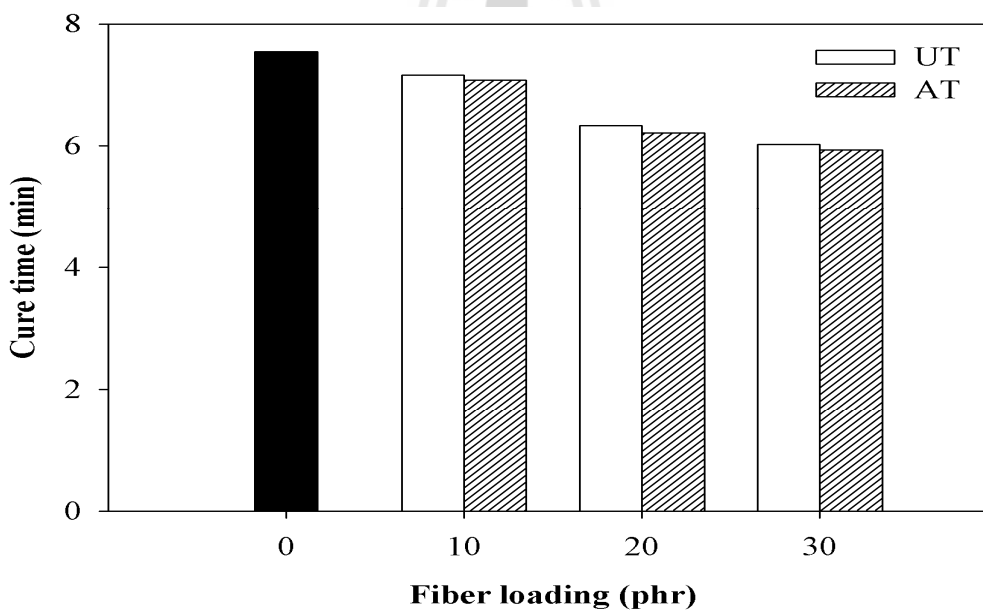
รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กสูงสุดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

#### 4.1.2 สมบัติทางกล (mechanical properties)

สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน แสดงดังตารางที่ 4.2

#### 4.1.2.1 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile properties)

ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain, M100) และค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain, M300) ของยางธรรมชาติ และคอมพอลิเมอร์ระหว่างเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรกับยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่า M100 และค่า M300 ของคอมพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการลดลงของความยืดหยุ่นของสายโซ่ยางส่งผลให้คอมพอลิเมอร์แข็ง (rigid) ขึ้น ในรูปที่ 4.7 แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่าคอมพอลิเมอร์ในทุกอัตราส่วนปริมาณเส้นใย เพราะว่าการดึงยืดสามารถเหนี่ยวนำให้ยางธรรมชาติเกิดผลึก (strain-induced crystallization) ของยางถูกรบกวนโดยเส้นใย [Mathew and Joseph, 2007] ดังนั้นประสิทธิภาพในการเกิดผลึกจากการดึงยืดจึงลดลงเป็นเหตุให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมพอลิเมอร์ระหว่างเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและยางธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย เนื่องจากว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยให้มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยทำให้การถ่ายเทความเค้น (stress transfer) เกิดยากขึ้นและยังเป็นการรบกวนความสม่ำเสมอของเฟสเมทริกซ์อีกด้วย [De et al., 2006] ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมพอลิเมอร์มีค่าลดลง การใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรเข้าไปในยางธรรมชาติยังทำให้ค่าการยืดตัวก่อนขาด (elongation at break) มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.8 และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้คอมพอลิเมอร์แข็ง (stiff) ขึ้นส่งผลให้แรงต้านทานต่อการยืดตัวลดลง

เมื่อปริมาณของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เชชันในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พบว่าค่า M100 ค่า M300 ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวก่อนขาดของคอมพอลิเมอร์ให้แนวโน้มเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรลงในยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.8 Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] พบผลที่คล้ายกันเมื่อทดสอบกับคอมพอลิเมอร์ระหว่างเส้นใยปอปิด (isora fiber) และยางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.5-4.8 พบว่าคอมพอลิเมอร์ของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เชชันให้ค่า M100 ค่า M300 ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวก่อนขาดสูงกว่าคอมพอลิเมอร์ของเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร เนื่องมาจากการทำอัลคาไลน์เชชันทำให้เฮมิเซลลูโลส สารพวกขี้ผึ้ง และสารปนเปื้อนต่างๆ ถูกกำจัดออกไปจากเส้นใย ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความเค้นที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น Lopattananon และคณะ [Lopattananon

et al., 2006] พบผลที่คล้ายกันในการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเส้นใยสับปะรดที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

#### 4.1.2.2 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด (tear properties)

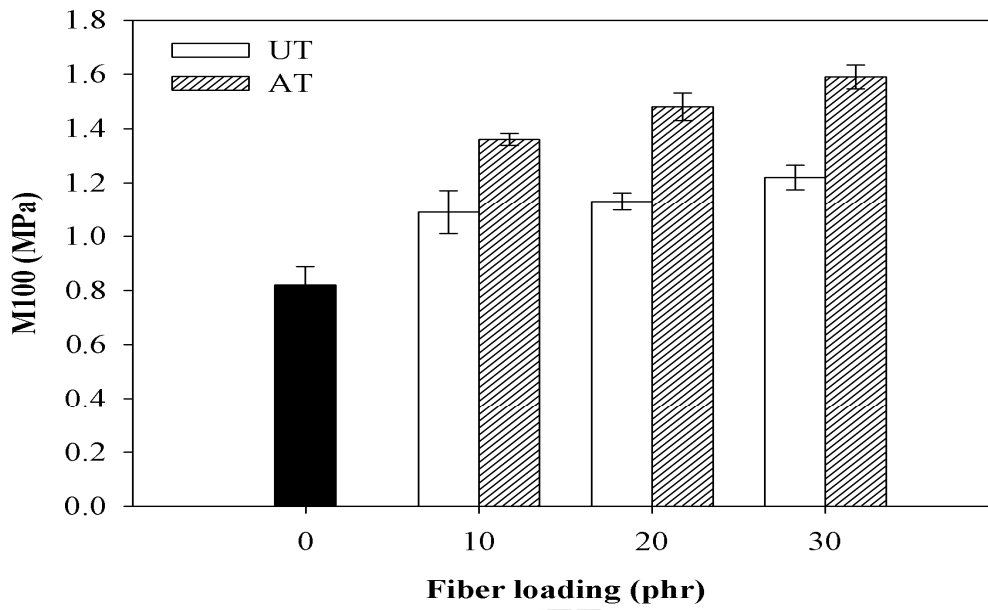
ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติ และคอมโพสิทระหว่างเส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปรกับยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยไปขวางแนวการฉีกขาดทำให้การขยายของรอยแยก (crack propagation) เกิดยากขึ้น [Ismail et al., 1997] โดยพบแนวโน้มที่คล้ายกับเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันในยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิทที่ไม่ได้ดัดแปรกับคอมโพสิทที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน พบว่าคอมโพสิทที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูงกว่าคอมโพสิทที่ไม่ได้ดัดแปรเพราะว่ามีแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติที่ดีกว่า Mathew และ Joseph [Mathew and Joseph, 2007] พบผลที่คล้ายกันในการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเส้นใยปออบิด



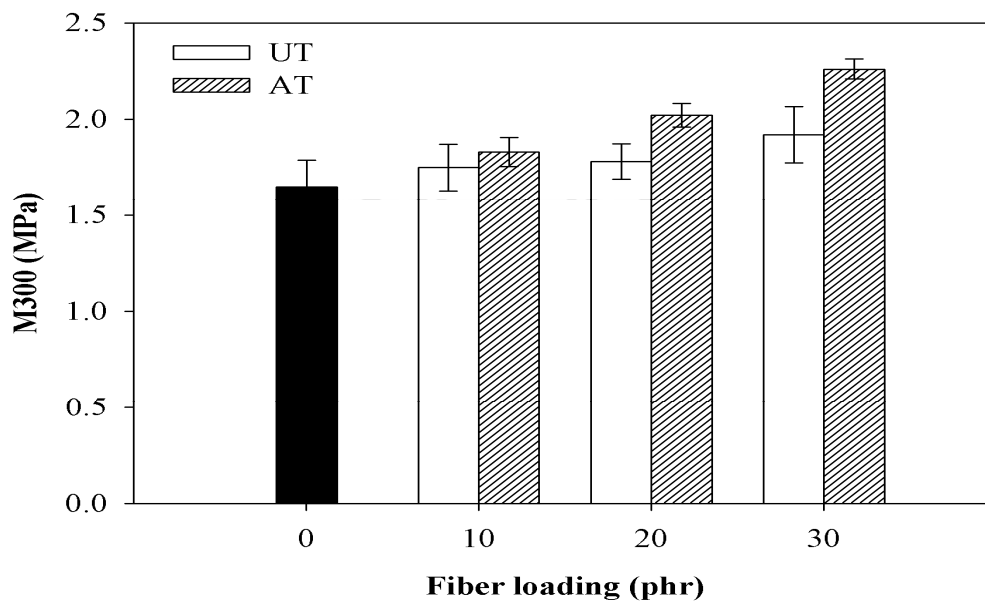
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้คัดแปรและยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ เซลล์ที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ

Formulation	M100 (MPa)	M300 (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (IRHD)	Tear strength (kN/m)
NR	0.82±0.068	1.65±0.138	20.13±0.113	1350±17.67	39.34±0.195	21.38±0.471
NR/10 UT	1.09±0.081	1.75±0.132	11.05±0.121	1090±21.22	45.96±0.955	22.43±1.220
NR/20 UT	1.13±0.032	1.78±0.112	9.67±0.092	1050±19.03	49.14±0.776	24.91±0.560
NR/30 UT	1.22±0.046	1.92±0.171	8.70±0.146	920±23.49	55.18±0.756	27.34±0.770
NR/10 AT	1.36±0.022	1.83±0.075	13.09±0.082	1111±19.21	50.74±1.775	26.54±1.450
NR/20 AT	1.48±0.051	2.02±0.061	11.04±0.104	1070±24.60	52.82±0.726	28.60±1.200
NR/30 AT	1.59±0.044	2.26±0.052	9.42±0.093	950±18.44	59.16±0.896	30.24±0.890

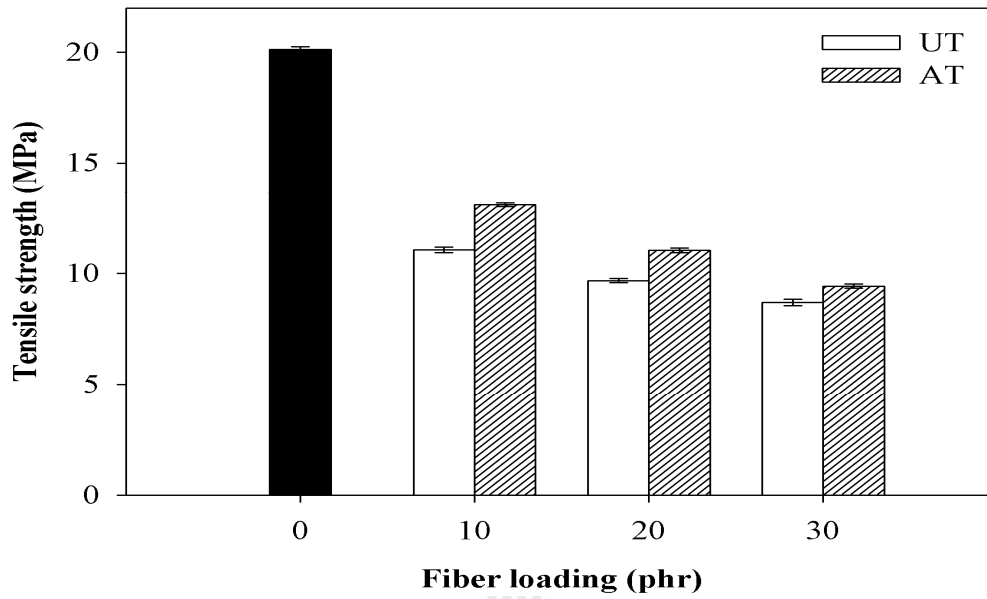




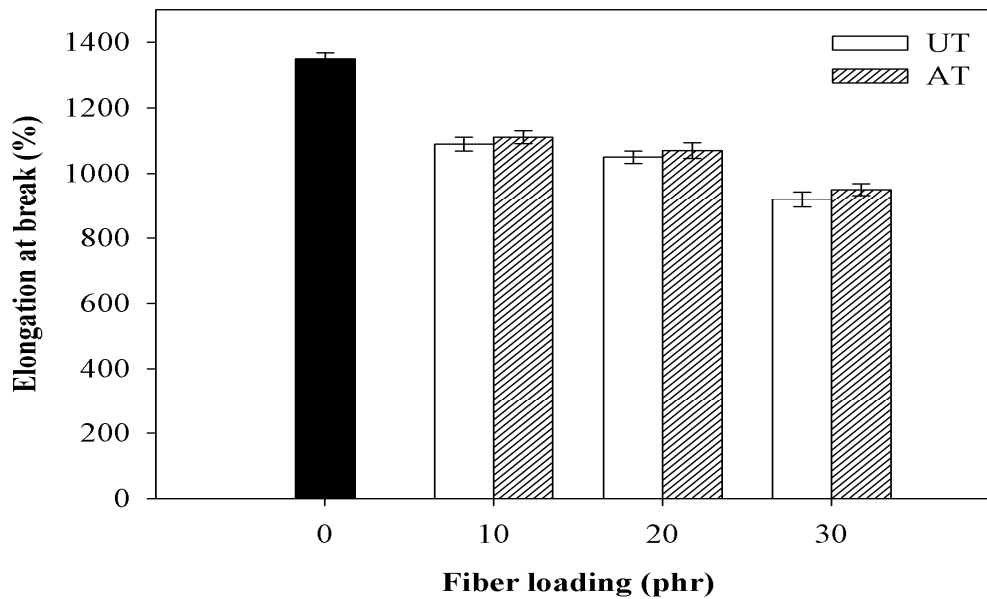
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



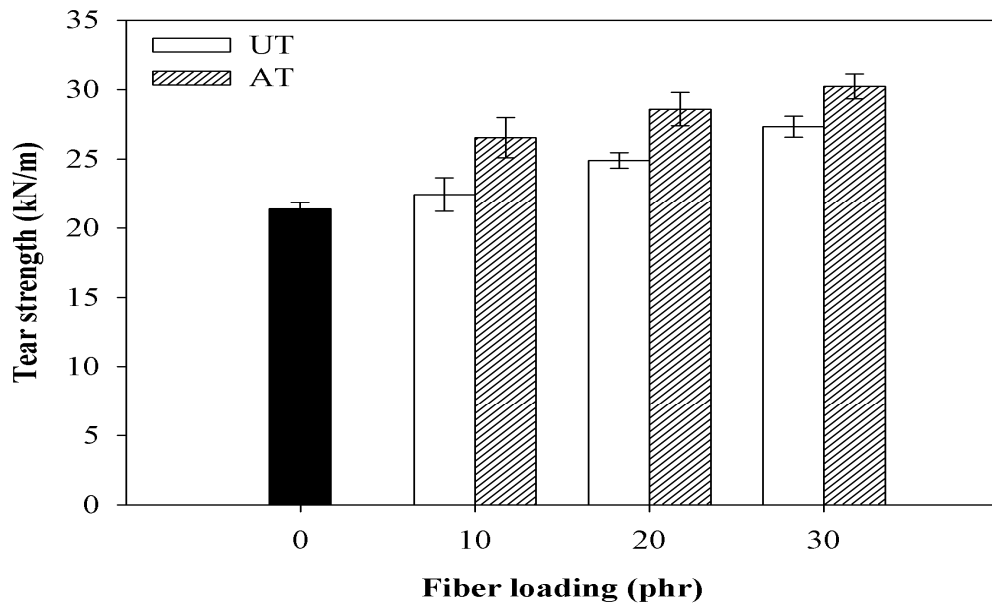
รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



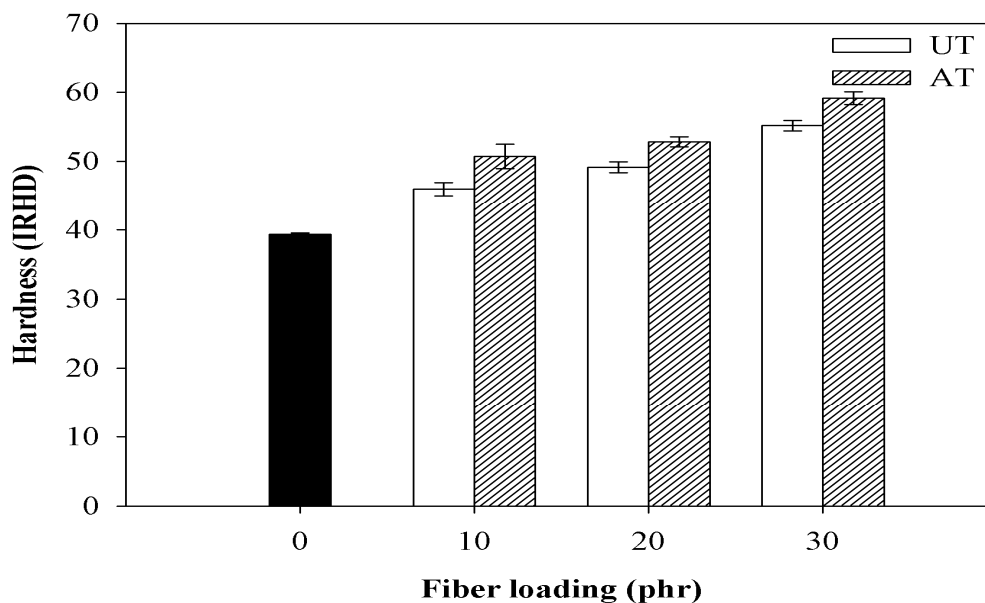
รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าการยืดตัวก่อนขาดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรและคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

#### 4.1.2.3 สมบัติด้านความแข็ง (hardness)

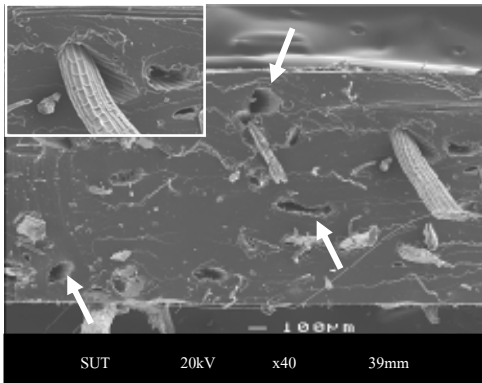
ค่าความแข็งของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรกับยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของเส้นใยส่งผลให้คอมโพสิตแข็ง (stiff) ขึ้นทำให้ค่าความแข็งของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากรูปที่ 4.10 ค่าความแข็งของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่ามากกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรเพราะว่าการทำอัลคาไลน์เซชันจะปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติให้ดีขึ้น De และคณะ [De et al., 2006] พบผลที่คล้ายกันในการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเส้นใยหญ้า



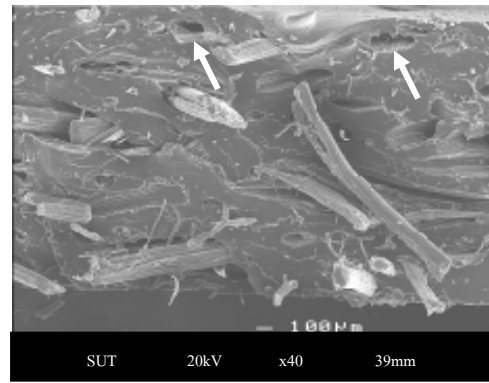
**รูปที่ 4.10** ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความแข็งของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

#### 4.1.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

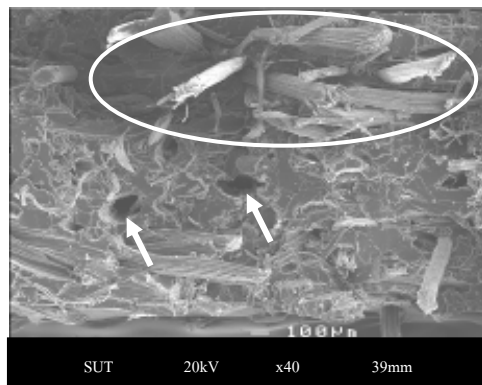
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปรที่ปริมาณเส้นใย 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.11 โดยพบว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ที่มีความเป็นขั้วสูงกับยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยในยางธรรมชาติ พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (b) และ (c) ซึ่งเป็นสาเหตุของการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิต ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันแสดงให้เห็นว่ามีการลดลงของช่องว่างที่เกิดจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ตัดแปร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ แต่อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยได้เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน



(a)

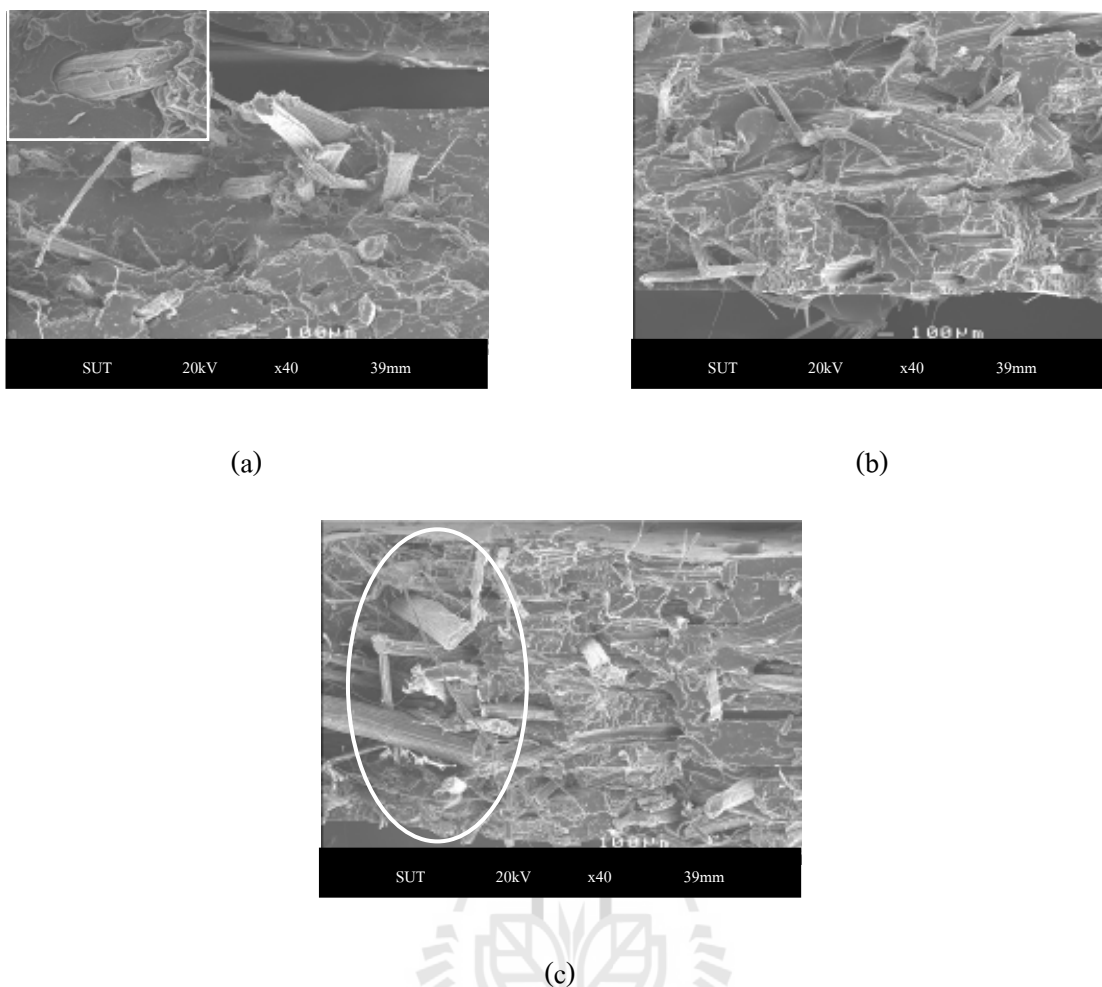


(b)



(c)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 40x ของคอมโพสิต (a) NR/10UT, (b) NR/20UT, และ (c) NR/30UT



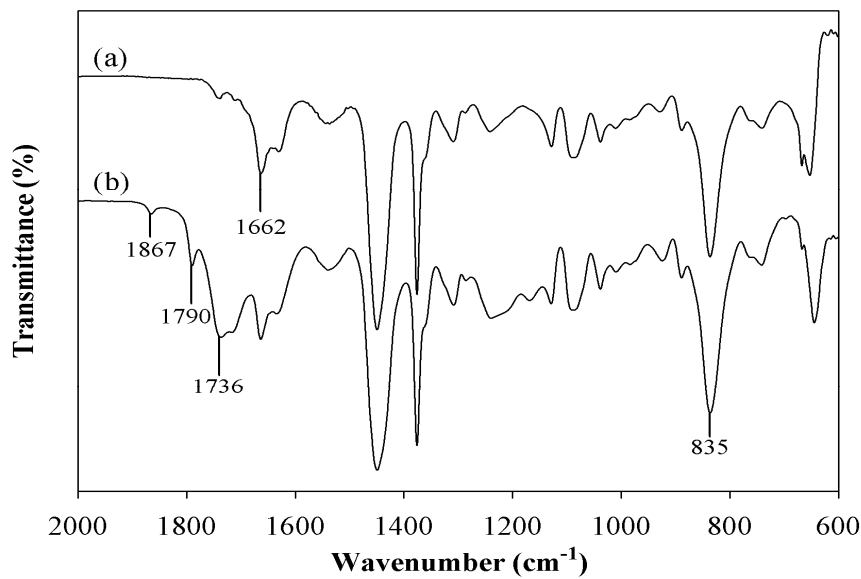
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 40x ของคอมโพลีทีท (a) NR/10AT, (b) NR/20AT, และ (c) NR/30AT

## 4.2 ผลของการใส่สารช่วยให้เข้ากัน และปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพลีทีทระหว่างปานตรนารายณ์และยางธรรมชาติ

### 4.2.1 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากสเปกตรัมของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในรูปที่ 4.13 พบว่ายางธรรมชาติแสดงพีคเฉพาะของ C=C ที่เลขคลื่น  $1662\text{ cm}^{-1}$  และ  $835\text{ cm}^{-1}$  ในขณะที่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงพีคใหม่ที่  $1867\text{ cm}^{-1}$  และ  $1790\text{ cm}^{-1}$  Lin-Vien และคณะ [Lin-Vien et al., 1991] รายงานว่าวงแหวนห้าเหลี่ยมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแอนไฮไดรด์จะแสดงพีคของ C=O ที่  $1870$  ถึง  $1845\text{ cm}^{-1}$  (weaker) และที่  $1800$  ถึง  $1775\text{ cm}^{-1}$  (stronger) ดังนั้นพีคใหม่ที่พบในสเปกตรัมของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่  $1867\text{ cm}^{-1}$  และ  $1790\text{ cm}^{-1}$  สามารถยืนยันได้ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้กราฟท์ติดบนยางธรรมชาติ นอกจากนี้ในสเปกตรัมของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์พบว่าไม่มีพีคที่  $698\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของ C=C ของมาเลอิก

แอนไฮไดรด์ ดังนั้นแสดงว่าไม่มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ในยางธรรมชาติ กราฟที่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยังพบว่ามียุคที่เลขคลื่น  $1736\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่คาร์บอนิลของ กรดอินทรีย์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเปิดวงของซัคซินิกแอนไฮไดรด์ โดยซัคซินิกแอนไฮไดรด์ที่ กราฟที่อยู่บนยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อความชื้น ดังนั้นวงแหวนแอนไฮไดรด์จึงสามารถเปิด ออก และทำให้เกิดกรดอินทรีย์ได้ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์ จากการหาปริมาณของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่กราฟท์บนยางธรรมชาติโดยวิธีการไทเทรต พบว่ามีมาเลอิกแอนไฮไดรด์อยู่เป็น ปริมาณ 1.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของยางธรรมชาติ (a) และยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (b)

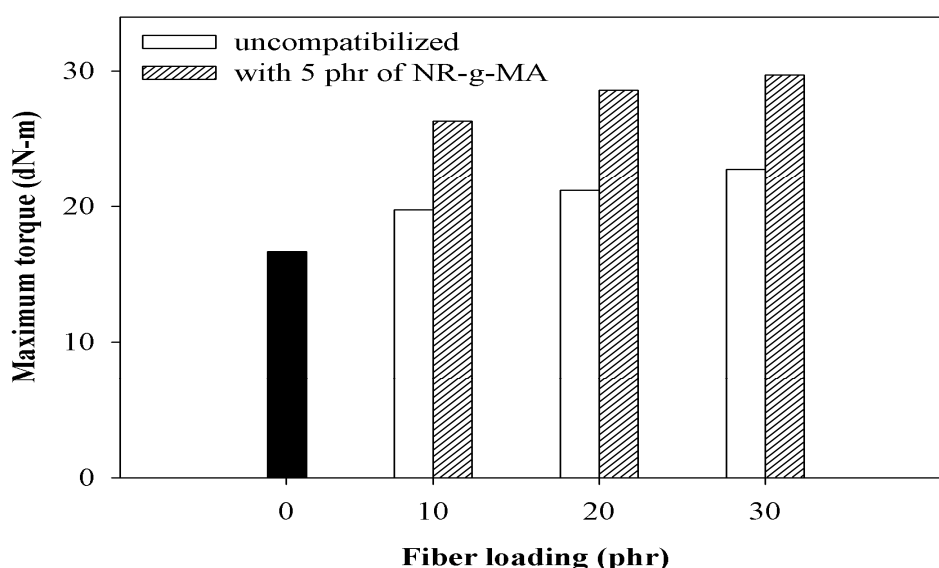
#### 4.2.2 สมบัติการคงรูป

ค่าทอร์กสูงสุด ค่าทอร์กต่ำสุด เวลาการสกอรัช และเวลาการคงรูป ของยางธรรมชาติ ยางคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยางคอมโพสิตที่ใส่ยาง ธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แสดงดังตารางที่ 4.3 ค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุดมีค่า เพิ่มขึ้น เมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากัน (ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์) ลงไปในคอมโพสิต ระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ เนื่องมาจากการปรับปรุงแรงยึดติดบริเวณผิวระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ และยางธรรมชาติ Ismail และ Haw [Ismail and Haw, 2008] พบว่าการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อเป็น สารช่วยให้เข้ากันส่งผลให้ค่าทอร์กสูงสุดของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปาล์มและยางธรรมชาติมีค่า เพิ่มขึ้น ค่าเวลาการสกอรัชและเวลาการคงรูปของยางคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยางคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แสดงดังรูป

ที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ ค่าเวลาการสกอร์ชและเวลาการคงรูปของยางคอมพโอสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีค่ามากกว่ายางคอมพโอสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากความเป็นกรดของกรดมาเลอิกและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ [Teh et al., 2004]

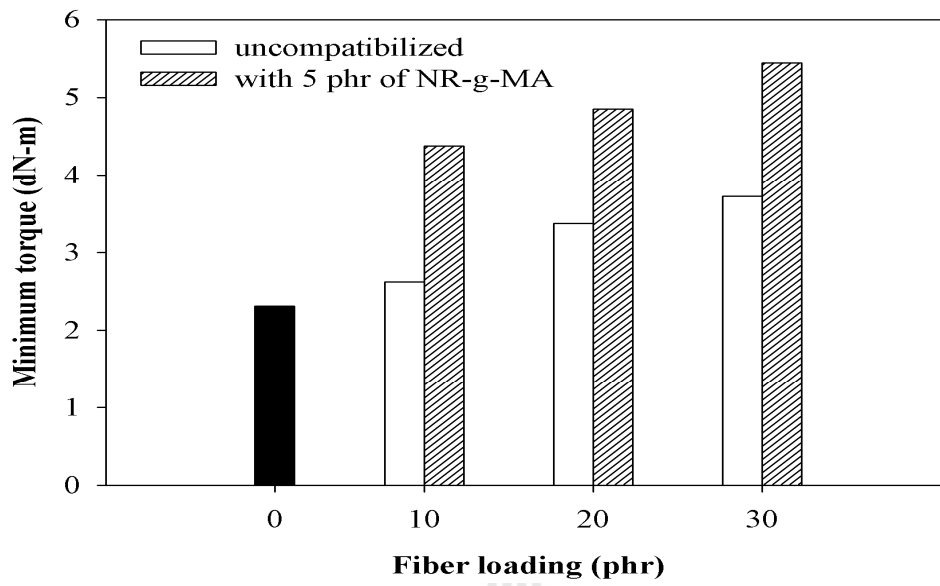
ตารางที่ 4.3 สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติ คอมพโอสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมพโอสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ

Formulation	MH (dN-m)	ML (dN-m)	Time (min)	
			$t_{s1}$	$t_{90}$
NR	16.662	2.310	4.27	7.54
NR/10 UT	19.741	2.620	3.35	7.16
NR/20 UT	21.170	3.373	3.29	6.33
NR/30 UT	22.790	3.722	3.20	6.02
NR/5 NR-g-MA/10 UT	26.348	4.376	4.22	8.43
NR/5 NR-g-MA/20 UT	28.612	4.847	4.06	8.05
NR/5 NR-g-MA/30 UT	29.734	5.446	4.03	7.72

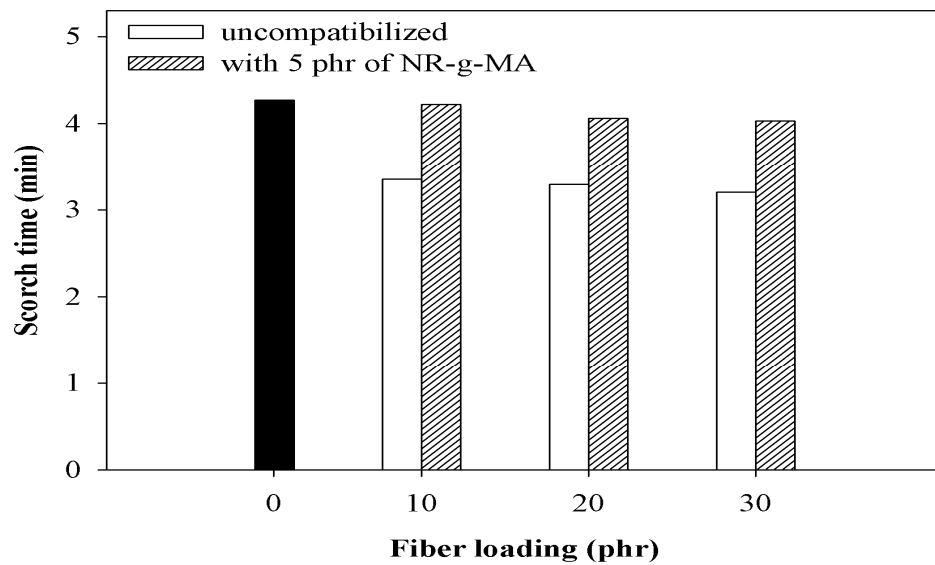


รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กสูงสุดของคอมพโอสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมพโอสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน

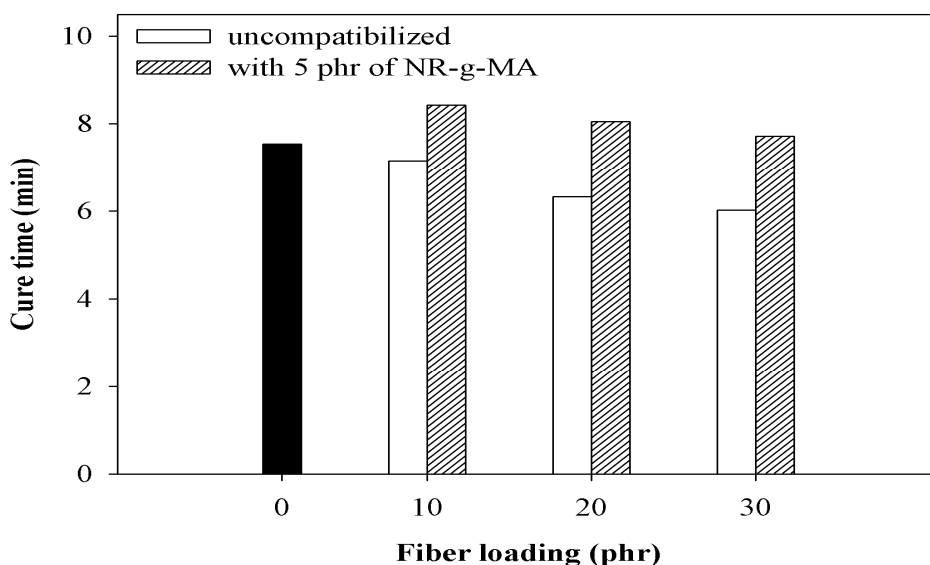




รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าทอร์กต่ำสุดของคอมพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมพอลิเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการสกอรัชของคอมพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมพอลิเมอร์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยยให้เข้ากัน และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน

#### 4.2.3 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของของยางธรรมชาติ ยางคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยางคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แสดงดังตารางที่ 4.4

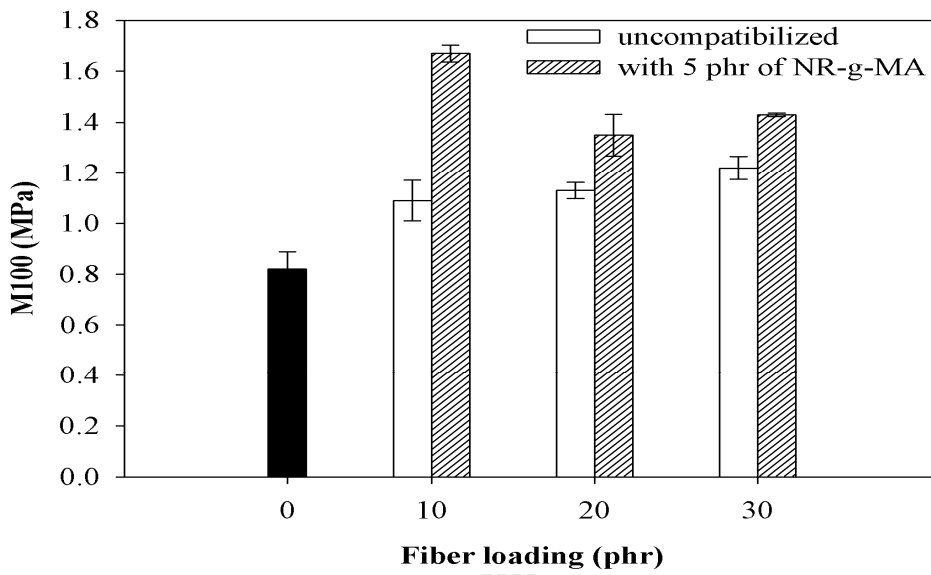
##### 4.2.3.1 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง

การใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงไปคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และยางธรรมชาติ ส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวก่อนขาดของยางคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ เนื่องมาจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์โดยยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ การปรับปรุงแรงยึดติดที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมาจากการเข้ากันได้ของส่วนที่เป็นยางธรรมชาติในยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับยางธรรมชาติ และการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนที่มีขั้วในยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย [Ismail and Haw, 2008] โดยยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีส่วนสำคัญในการลดแรงดึงบริเวณพื้นผิว (interfacial tension) และเพิ่มแรงยึดติดบริเวณพื้นผิว (interfacial adhesion) จึงส่งผลให้สมบัติความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น

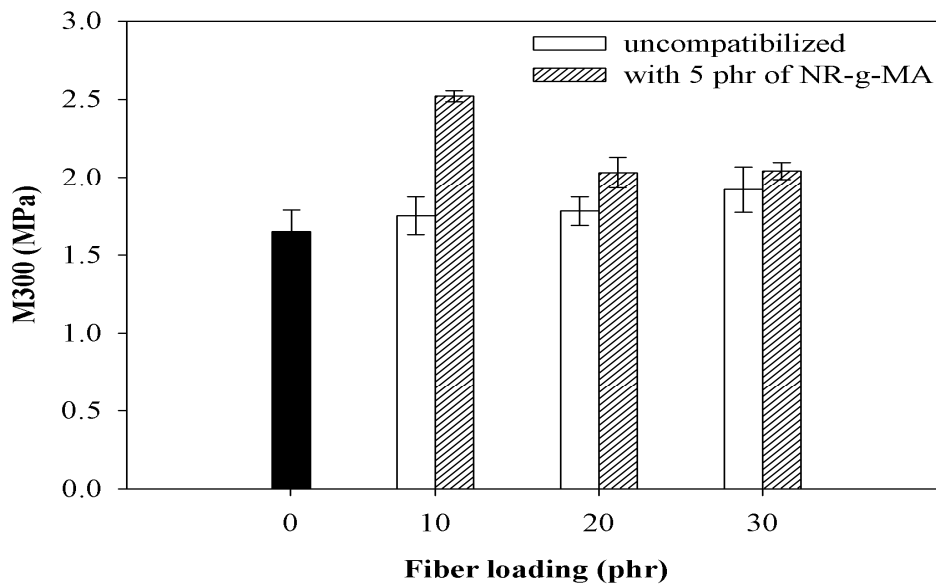
ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ คอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ

Formulation	M100 (MPa)	M300 (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (IRHD)	Tear strength (kN/m)
NR	0.82±0.068	1.65±0.138	20.13±0.113	1350±17.67	39.34±0.195	21.38±0.471
NR/10 UT	1.09±0.081	1.75±0.132	11.05±0.121	1090±21.22	45.96±0.955	22.43±1.220
NR/20 UT	1.13±0.032	1.78±0.112	9.67±0.092	1050±19.03	49.14±0.776	24.91±0.560
NR/30 UT	1.22±0.046	1.92±0.171	8.70±0.146	920±23.49	55.18±0.756	27.34±0.770
NR/5 NR-g-MA/10 UT	1.67±0.033	2.52±0.035	15.75±0.087	1139±18.34	52.38±0.925	31.87±1.548
NR/5 NR-g-MA/20 UT	1.35±0.082	2.03±0.100	11.01±0.184	1107±17.67	56.89±0.939	33.41±1.777
NR/5 NR-g-MA/30 UT	1.43±0.007	2.04±0.056	9.44±0.219	961±19.29	61.12±0.676	34.67±0.588

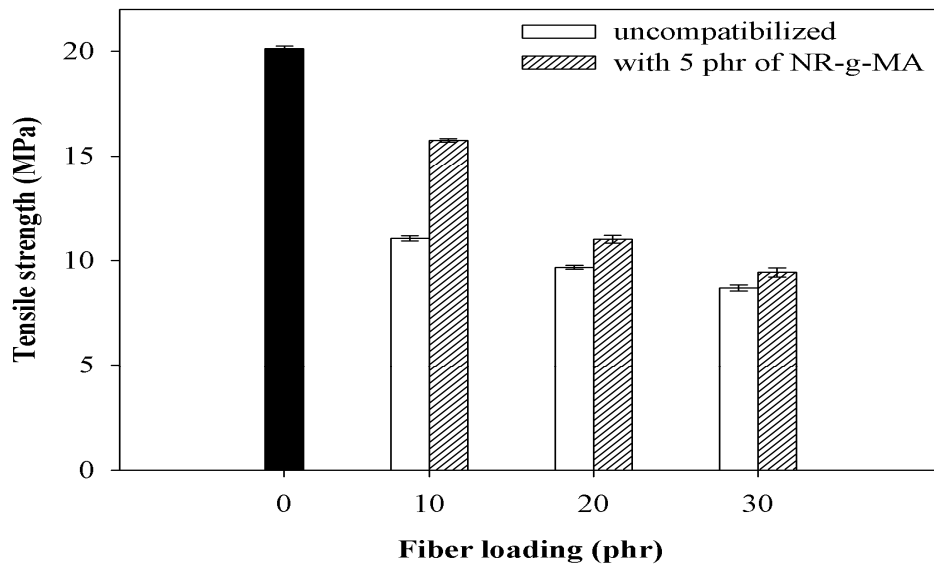




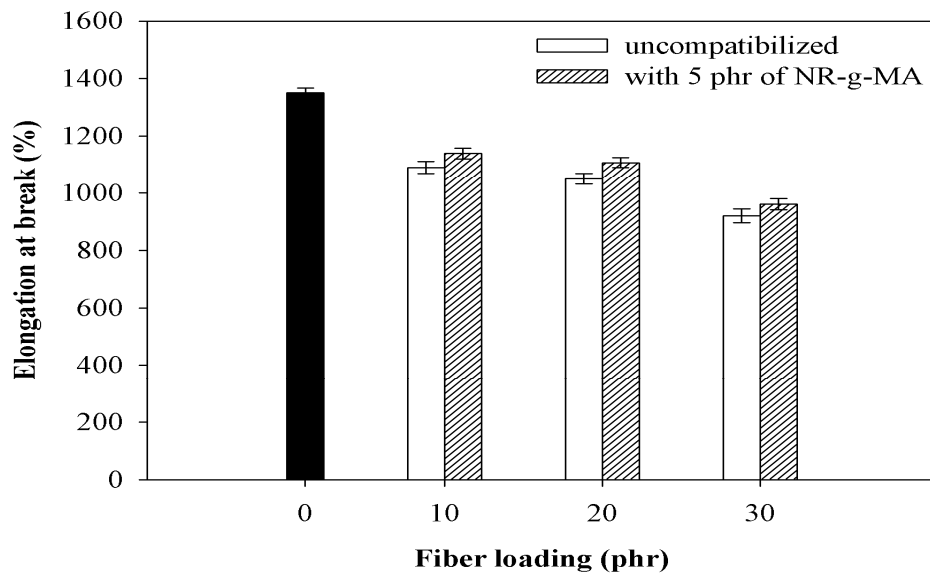
รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซนต์การดึงยืดของคอมพอลิไทท์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมพอลิไทท์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน



รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซนต์การดึงยืดของคอมพอลิไทท์ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมพอลิไทท์ที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน



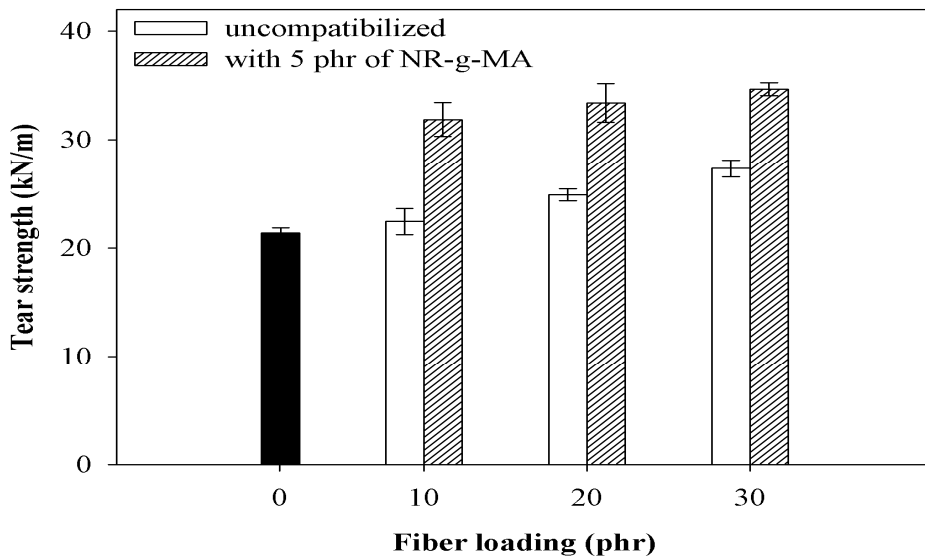
รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมพอลิทีทที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมพอลิทีทที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน



รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าการยืดตัวก่อนขาดของคอมพอลิทีทที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมพอลิทีทที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน

#### 4.2.3.2 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด

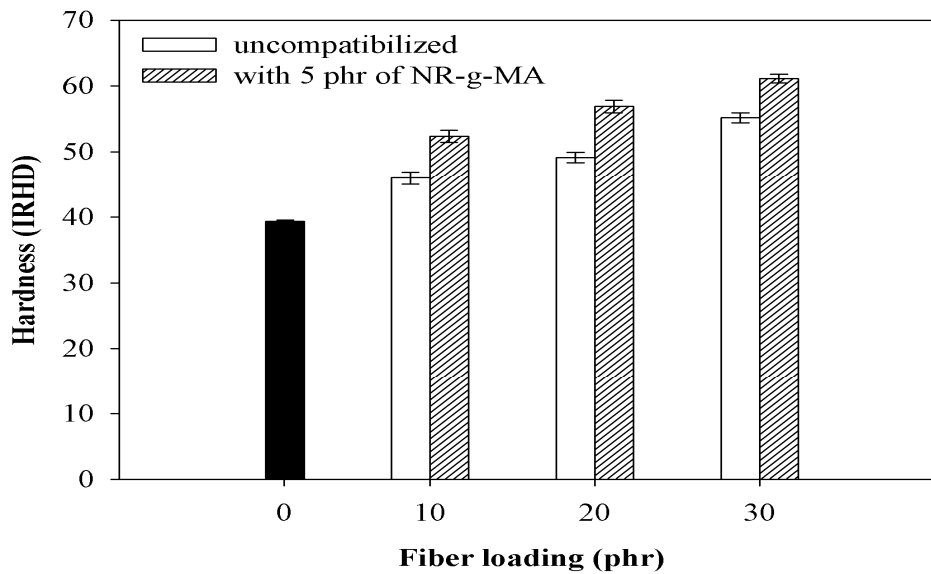
ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยางคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณเส้นใยต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยค่าความทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยไปขวางแนวการฉีกขาดทำให้การขยายของรอยแยกเกิดยากขึ้น [Ismail et al., 1997] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยางคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปช่วยให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติดีขึ้น



รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากันและคอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน

#### 4.2.3.3 สมบัติด้านความแข็ง

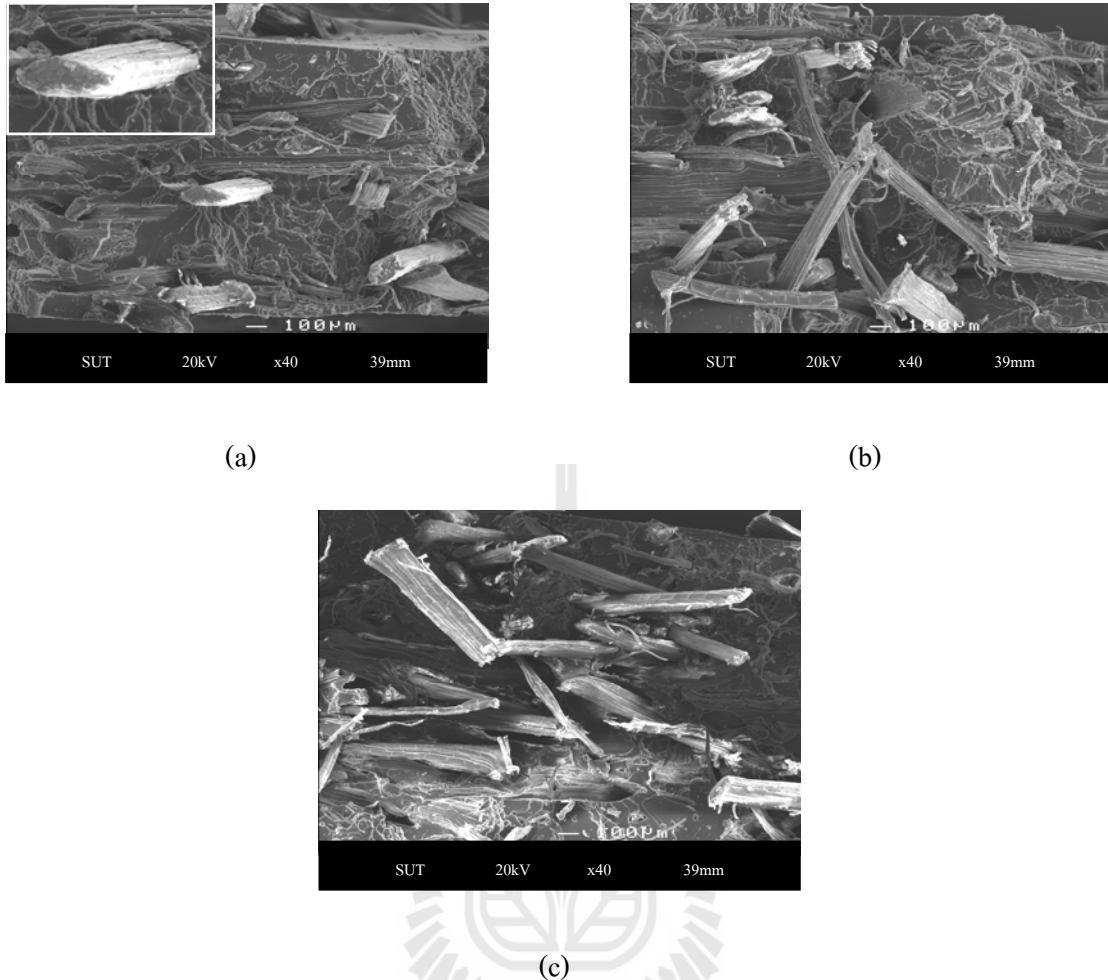
เมื่อใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในยางคอมโพสิต ส่งผลให้ค่าความแข็งของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของยางคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ทั้งนี้เนื่องจากสารช่วยให้เข้ากันเข้าไปปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติให้ดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยในยางธรรมชาติจะส่งผลให้ยางคอมโพสิตแข็งขึ้นทำให้ค่าความแข็งของยางคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.23 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าความแข็งของคอมพอลิทีทที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน และคอมพอลิทีทที่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน

#### 4.2.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของคอมพอลิทีทที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณเส้นใย 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.24 โดยพบว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ที่มีความเป็นขั้วสูงกับยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้วมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับคอมพอลิทีทที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่แสดงในรูปที่ 4.11 นอกจากนี้สามารถสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยได้เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยในคอมพอลิทีทที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (b) และ (c)



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 40x ของคอมโพสิต (a) NR/10UT/5NR-g-MA (b) NR/20UT/5NR-g-MA และ (c) NR/30UT/5NR-g-MA

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของยางคอมโพสิตที่มีการใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ชันและยางคอมโพสิตที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันพบว่ายางคอมโพสิตที่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีสมบัติทางกลที่ดีกว่า เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติที่ดีกว่า

### 4.3 ผลของการใส่เส้นใยสองชนิดต่อสมบัติของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

#### 4.3.1 สมบัติการคงรูป

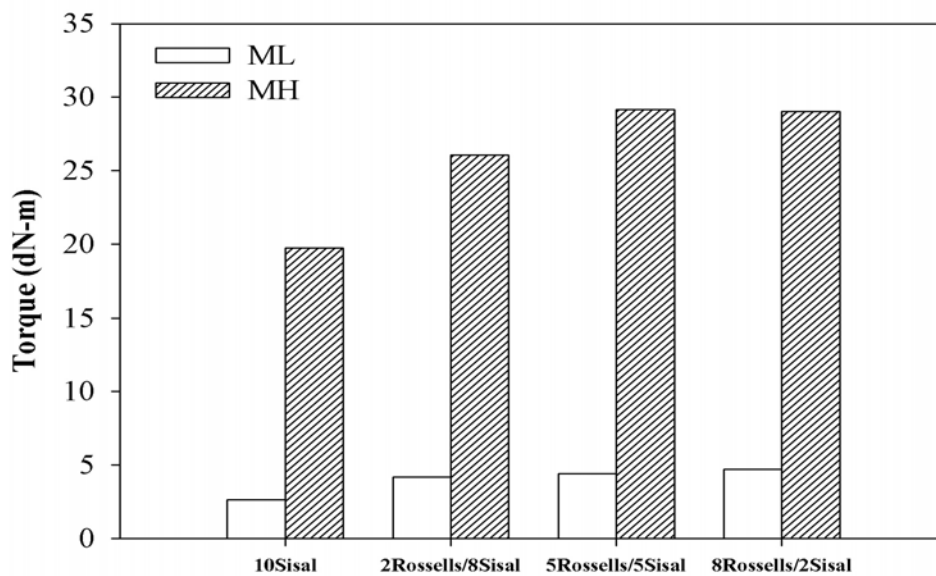
ค่าทอร์คสูงสุด ค่าทอร์คต่ำสุด เวลาการสกอรัช และเวลาการคงรูป ของยางคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานศรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้ว แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยปริมาณรวมของเส้นใยอยู่ที่ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ อัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วเป็น 10 ต่อ 0 8 ต่อ 2 5 ต่อ 5 และ 2 ต่อ 8 ค่าทอร์คสูงสุด และค่าทอร์คต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยปอแก้วในคอมโพสิต และเริ่มคงที่หลังจากปริมาณของเส้นใยปอแก้วใน



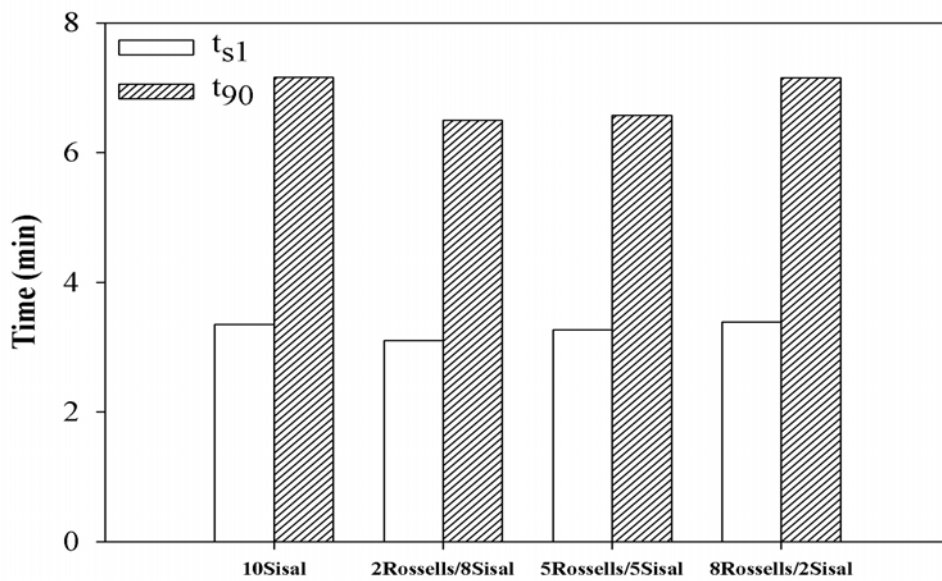
คอมโพสิตที่มีปริมาณมากกว่า 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แต่อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของเวลาการสกอรัช และเวลาการคงรูปของคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณส่วนของเส้นใยปอแก้วในคอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.26

ตารางที่ 4.5 สมบัติการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

Formulation	MH (dN-m)	ML (dN-m)	Time (min)	
			$t_{s1}$	$t_{90}$
10 Sisal	16.662	2.310	4.27	7.54
2 Rossells – 8 Sisal	26.048	4.191	3.10	6.50
5 Rossells – 5 Sisal	29.139	4.435	3.27	6.57
8 Rossells – 2 Sisal	29.013	4.718	3.39	7.15



รูปที่ 4.25 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุดของคอมโพสิต



รูปที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อเวลาการสกอรัชและเวลาการคงรูปของคอม โพลีท

#### 4.2.4 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของยางคอม โพลีทของยางธรรมชาติที่อัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้วเป็น 10 ต่อ 0 8 ต่อ 2 5 ต่อ 5 และ 2 ต่อ 8 แสดงดังตารางที่ 4.6

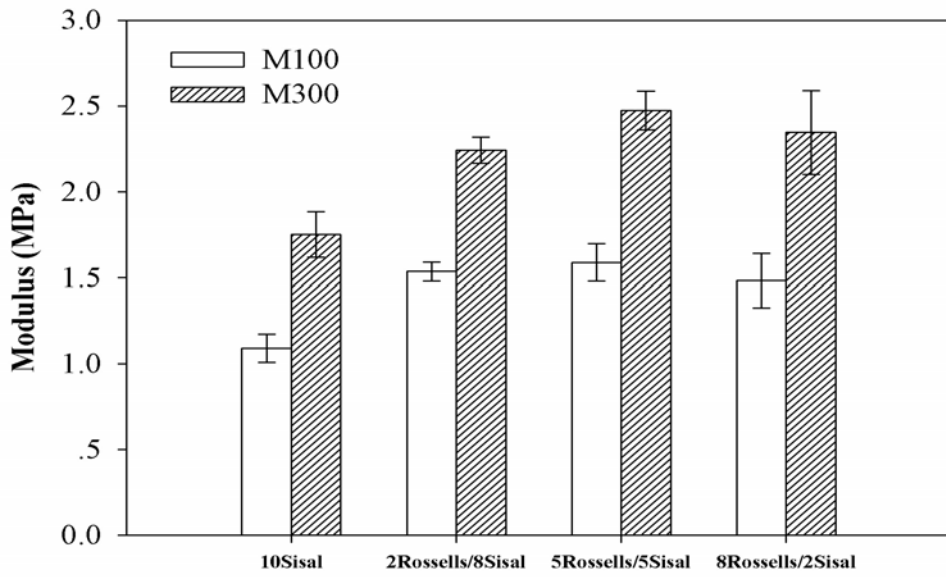
##### 4.3.2.1 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง

การเพิ่มปริมาณส่วนของเส้นใยปอแก้วในคอม โพลีทไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ในขณะที่รูป 4.28 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณส่วนของเส้นใยปอแก้วในคอม โพลีท ทั้งนี้โดยสมบัติของเส้นใยปอแก้วจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงมากกว่าเส้นใยปานสรนารายณ์ ดังนั้นจึงส่งผลให้คอม โพลีทที่มีปริมาณส่วนของเส้นใยปอแก้วเพิ่มขึ้นมีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความทนทานต่อแรงดึงของเส้นใยปอแก้วมีค่า  $473.4 \pm 120.2$  MPa และค่ามอดูลัสของยังก็มีค่า  $40.6 \pm 9.9$  GPa ส่วนเส้นใยปานสรนารายณ์มีค่า  $385.5 \pm 175.7$  MPa และค่ามอดูลัสของยังก็มีค่า  $33.7 \pm 17.3$  GPa [Naraprateep, 2007] Jacob และคณะ [Jacob et al., 2004] พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงขึ้นกับอัตราส่วนของปริมาณเส้นใยปานสรนารายณ์มากกว่าเส้นใยปาล์ม เนื่องจากสมบัติของเส้นใยปานสรนารายณ์มีค่าความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าเส้นใยปาล์ม ในกรณีของค่าการยึดตัวก่อนขาดของคอม โพลีทไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำการเพิ่มปริมาณส่วนของเส้นใยปอแก้วในคอม โพลีทดังแสดงในรูปที่ 4.29

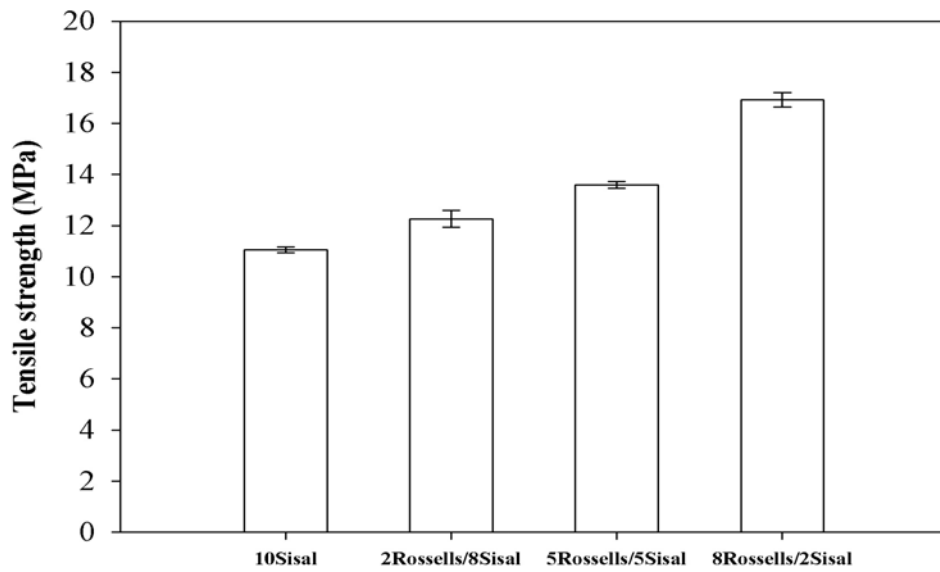
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่างๆ

<b>Formulation</b>	<b>M100 (MPa)</b>	<b>M300 (MPa)</b>	<b>Tensile strength (MPa)</b>	<b>Elongation at break (%)</b>	<b>Hardness (IRHD)</b>	<b>Tear strength (kN/m)</b>
10 Sisal	1.09±0.081	1.75±0.132	11.04±0.121	1090±21.22	49.96±0.955	22.43±1.220
2 Rossells – 8 Sisal	1.54±0.130	2.24±0.080	12.26±0.331	1136±16.31	45.42±2.368	29.67±1.920
5 Rossells – 5 Sisal	1.59±0.110	2.47±0.172	13.59±0.133	1085±20.93	49.60±2.954	35.56±1.750
8 Rossells – 2 Sisal	1.48±0.160	2.35±0.244	16.92±0.287	1161±13.74	49.74±3.602	32.77±1.490

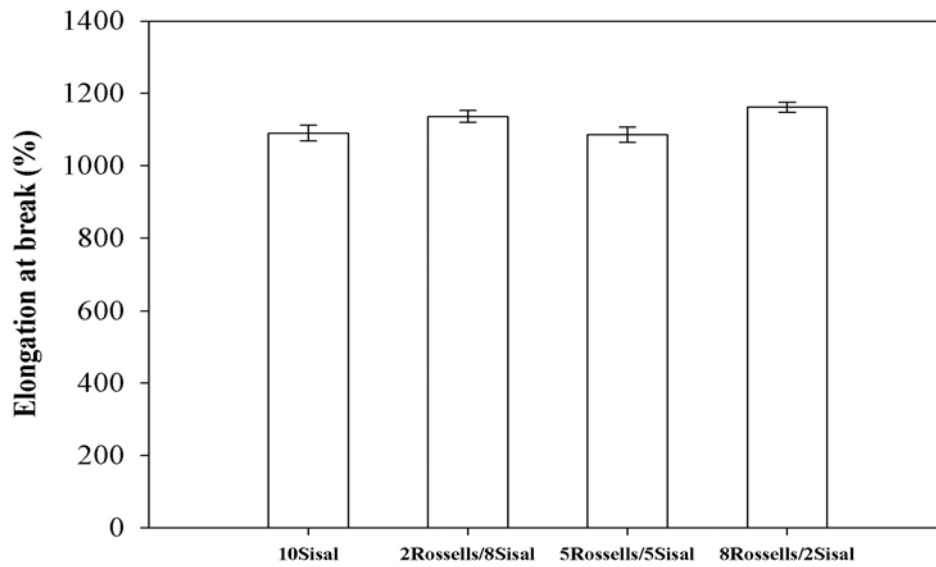




รูปที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพสิต



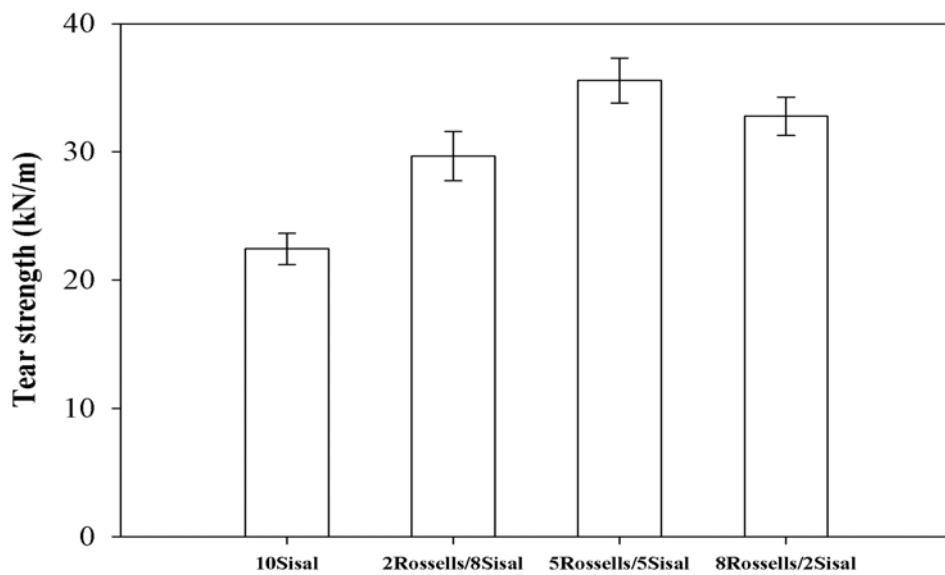
รูปที่ 4.28 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิต



รูปที่ 4.29 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าการยืดตัวก่อนขาดของคอมโพสิต

#### 4.3.2.2 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด

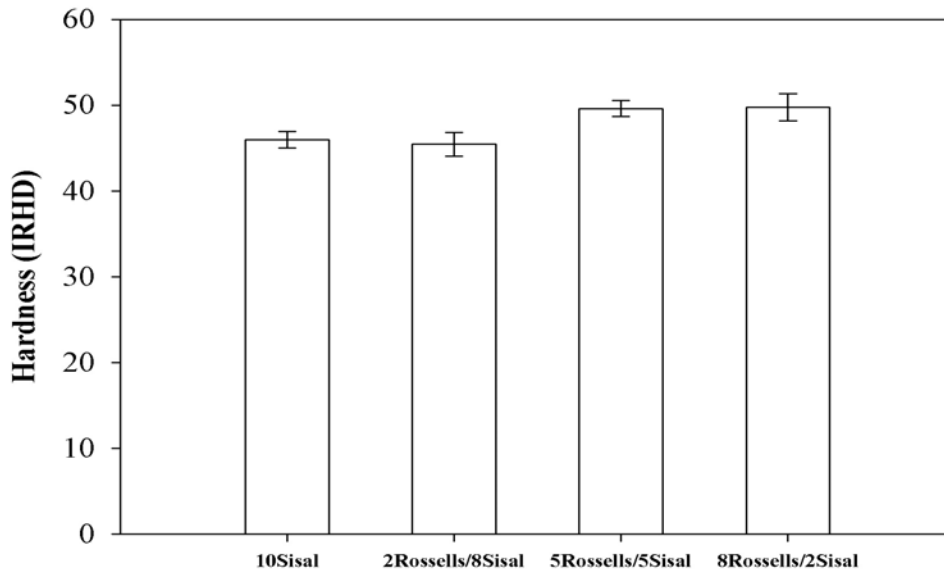
ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตเมื่อเพิ่มปริมาณส่วนของเส้นใยปอแก้ว แสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณส่วนเส้นใยปอแก้วค่าความทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงหลังจากปริมาณของเส้นใยปอแก้วในคอมโพสิตมีปริมาณมากกว่า 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตจะมาจากสมบัติของเส้นใยปอแก้วที่มีค่าความแข็งมากกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 4.30 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิต

#### 4.3.2.3 สมบัติด้านความแข็ง

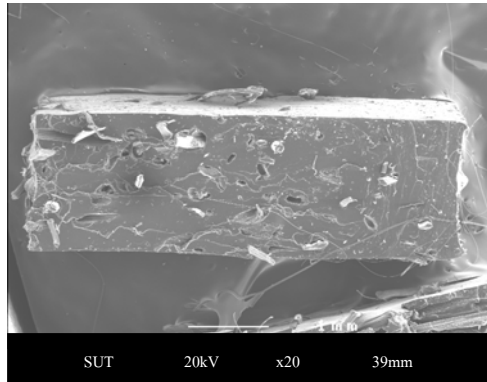
เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนเส้นใยปอแก้วในยางคอมโพสิตส่งผลให้ค่าความแข็งของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่หลังจากปริมาณของเส้นใยปอแก้วในคอมโพสิตมีปริมาณมากกว่า 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณส่วนเส้นใยปอแก้วที่มีความแข็งมากกว่าส่วนเส้นใยป่านศรนารายณ์ จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น



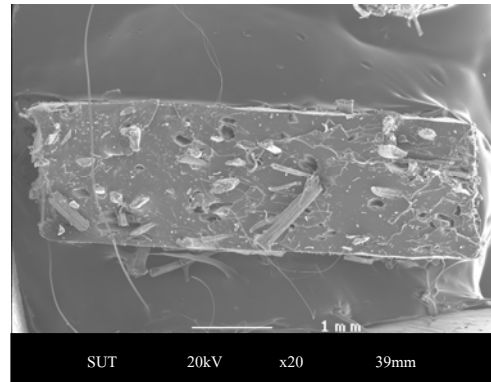
รูปที่ 4.31 ผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์และเส้นใยปอแก้วต่อค่าความแข็งของคอมโพสิต

#### 4.3.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

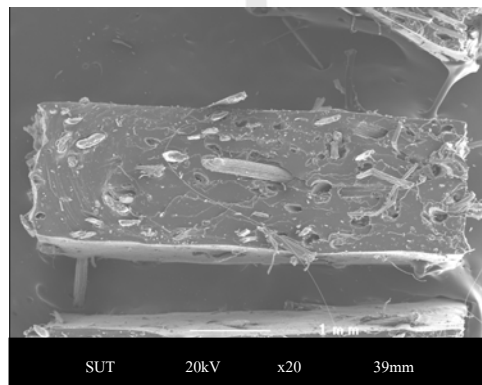
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของยางคอมโพสิตที่อัตราส่วนระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้วเป็น 8 ต่อ 2 5 ต่อ 5 และ 2 ต่อ 8 แสดงในรูปที่ 4.32 โดยพบว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นจากการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์เนื่องมาจากแรงยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้วที่มีความเป็นขี้สูงกับยางธรรมชาติที่ไม่มีขี้ นอกจากนี้ยังพบการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยทั้งสองชนิดเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยปอแก้วในคอมโพสิต



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 20x ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ (a) 2 Rossells – 8 Sisal, (b) 5 Rossells – 5 Sisal, และ (c) 8 Rossells – 2 Sisal



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่าน็อคูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ค่าน็อคูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความแข็งของคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปร และคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าการยึดตัวก่อนขาด มีค่าลดลง เนื่องมาจากการลดลงของความยืดหยุ่นของสายโซ่อย่างส่งผลให้คอมโพสิตแข็งขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยในคอมโพสิตให้มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยทำให้การถ่ายเทความเค้นเกิดยากขึ้นและยังเป็นการรบกวนความสม่ำเสมอของเมทริกซ์

2. คอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันให้คุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่ไม่ได้ดัดแปรในทุกปริมาณเส้นใย เมื่อเส้นใยถูกดัดแปรด้วยสารละลายต่างส่งผลให้เฮมิเซลลูโลส สารพวกจีคิง และสารปนเปื้อนต่างๆ ถูกกำจัดออกไปจากเส้นใยส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความเค้นที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการทำอัลคาไลน์เซชันไม่ได้ส่งผลต่อค่าเวลาการสกอรัช และค่าเวลาการคงรูปของคอมโพสิต

3. จากการใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากันในคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสนรารายณ์และยางธรรมชาติ พบว่าสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตได้ดี เนื่องมาจากยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปช่วยปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเส้นใยปานสนรารายณ์ และยางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเวลาการสกอรัช และเวลาการคงรูปของยางคอมโพสิตที่ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีค่ามากกว่ายางคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องมาจากความเป็นกรดของกรดมาเลอิกและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ

4. การใส่สารช่วยให้เข้ากันมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการปรับปรุงสมบัติทางกลของยางคอมโพสิตเมื่อเปรียบเทียบกับการทำอัลคาไลน์เซชัน เนื่องจากการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติที่ดีกว่า

5. การใส่เส้นใยปอแก้วร่วมกับเส้นใยปานสนรารายณ์ส่งผลในการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของยางคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยปอแก้วจะมีความแข็งมากกว่าเส้นใยปานสนรารายณ์

## บรรณานุกรม

- Abdelmouleh, M., Boufi, S., Belgacem, M. N., and Dufresne, A. (2007). Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading. Comp. Sci. Tech. 67. 1627-1639.
- Bisanda, E. T. N. (2000). The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibres. Appl. Comp. Mat. 7. 331-339.
- De, D., De, D., and Adhikari, B. (2006). Curing characteristics and mechanical properties of alkali-treated grass-fiber-filled natural rubber composites and effects of bonding agent. J. Appl. Polym. Sci. 101. 3151-3160.
- Gassan, J. and Gutowski, V. S. (2000). Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites. Comp. Sci. Tech. 60. 2857-2863.
- Gassan, J., Gutowski, V. S., and Bledzki, A. K. (2000). About the surface characteristics of natural fibres. Macro. Mat. Eng. 283. 132-139.
- Gonzalez, A. V., Cervantes Uc, J. M., Olayo, R., and Herrera Franco, P. J. (1999). Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. Composites: Part B. 30. 309-320.
- Hakkou, M., Petrisana, M., Zoulalian, A., and Gerardin, P. (2005). Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polym. Degrad. Stab. 89. 1-5.
- Ismail, H., Edyham, M. R., and Wirjosentono, B. (2002). Bamboo fibre filled natural rubber composites: The effects of filler loading and bonding agent. Polym. Test. 21. 139-144.
- Ismail, H. and Haw, F. S. (2008). Effects of palm ash loading and maleated natural rubber as a coupling agent on the properties of palm-ash-filled natural rubber composites. J. Appl. Polym. Sci. 110. 2867-2876.
- Ismail, H., Rozman, H. D., Jaffri, R. M., and Mohd Ishak, Z. A. (1997). Oil palm wood flour reinforced epoxidized natural rubber composites: The effect of filler content and size. Eur. Polym. J. 33. 1627-1632.
- Ismail, H., Rusli, A., and Rashid, A. A. (2005). Maleated natural rubber as a coupling agent for paper sludge filled natural rubber composites. Polym. Test. 24. 856-862.

- Ismail, H., Rusli, A., and Rashid, A. A. (2006). The effect of filler loading and epoxidation on paper-sludge-filled natural rubber composites. Polym. Plast. Technol. Eng. 45. 519-525.
- Jacob, M., Francis, B., Thomas, S., and Varughese, K. T. (2006). Dynamical mechanical analysis of sisal fiber/oil palm hybrid fiber-reinforced natural rubber composites. Polym. Compos. 27. 671-680.
- Jacob, M., Francis, B., Varughese, K. T., and Thomas, S. (2008). Effect of chemical modification on properties of hybrid fiber biocomposites. Composites: Part B. 39. 352-363.
- Jacob, M., Thomas, S., and Varughese, K. T. (2004). Natural rubber composites reinforced with sisal/oil palm hybrid fibers: Tensile and cure characteristics. J. Appl. Polym. Sci. 93. 2305-2312.
- Jacob, M., Thomas, S., and Varughese, K. T. (2006). Novel woven sisal fabric reinforced natural rubber composites: Tensile and swelling characteristics. J. Comp. Mat. 40. 1471-1485.
- Lin-Vien, D., Colthup, N. B., Fateley, W. G., and Grasselli, J. G. (1991). The handbook of infrared and raman characteristic frequencies of organic molecules. United Kingdom: Academic Press.
- Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K., and Ellis, B. (2006). Performance of pineapple leaf fiber–natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments. J. Appl. Polym. Sci. 102. 1974-1984.
- Mathew, L. and Joseph, R. (2007). Mechanical properties of short-isora-fiber-reinforced natural rubber composites: Effects of fiber length, orientation, and loading; alkali treatment; and bonding agent. J. Appl. Polym. Sci. 103. 1640-1650.
- Mohd Edeerozey, A. M., Md Akil, H., Azhar, A. B., and Zainal Ariffin, M. I. (2007). Chemical modification of kenaf fibers. Mater. Letters. 61. 2023-2025.
- Mwaikambo, L. Y. and Ansell, M. P. (2006). Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials II. Sisal fibres. J. Mater. Sci. 41. 2497-2508.
- Nakason, C, Kaesaman, A, and Supasanthitkul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. Polym. Test. 23. 35-41.
- Naraprteep, T. (2008). Effect of Compatibilizer and silane coupling agents on mechanical properties of natural fiber/polypropylene composites. Master Thesis. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

- Pattamaporn, C., Bandidchutikun, K., and Sotananan, S. (2008). The effect of rubber modification on physical properties of rice husk ash composites. Thammasat Int. J. Sci. Tech. 13. 36-43.
- Pothan, L. A., Thomas, S., and Groeninckx, G. (2006). The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banana fibre/polyester composites. Composites: Part A. 37. 1260-1269.
- Ray, D., Sarkar, B. K., Basak, R. K., and Rana, A. K. (2002). Study of the thermal behaviour of alkali-treated jute fibers. J. Appl. Polym. Sci. 85. 2594-2599.
- Rusche, H. (1973). Thermal degradation of wood at temperatures up to 200°C-part I: Strength properties of dried wood after heat treatment. Holz. Roh. Werkstoff. 31. 273-281.
- Saikia, D. (2008). Investigations on structural characteristics, thermal stability, and hygroscopicity of sisal fibers at elevated temperatures. Int. J. Thermophys. 29. 2215-2225.
- Sydenstricker, H. D., Mochnaz, S., and Amico, S. C. (2003). Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. Polym. Test. 22. 375-380.
- Teh, P. L., Mohd Ishak, Z. A., Hashim, A. S., Karger-Kocsis, J., and Ishiaku, U. S. (2004). Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites. Eur. Polym. J. 40. 2513-2521.
- Zeng, Z., Ren, W., Xu, C., Lu, W., Zhang, Y., and Zhang, Y. (2010). Maleated natural rubber prepared through mechanochemistry and its coupling effects on natural rubber/cotton fiber composites. J. Polym. Res. 17. 213-219.

## ประวัตินักวิจัย

### หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกัจจร ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2533 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering) University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 35 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 5 ฉบับ

### ผู้ร่วมวิจัย

นางสาว นิธินาถ สุภกาญจน์ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Macromolecular Science) University of Case Western Reserve, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ การตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer characterization) และพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 40 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 8 ฉบับ