

รหัสโครงการ SUT7-710-53-24-36



รายงานการวิจัย

การศึกษาการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุง  
ด้วยยางธรรมชาติ

[Studies of sisal fiber reinforced natural rubber-modified  
epoxy resin]

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุง  
ด้วยยางธรรมชาติ

[Studies of sisal fiber reinforced natural rubber-modified  
epoxy resin]

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราณี ชุมคำโรง

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ สุภกาญจน์

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2556

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การศึกษาการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วย  
ยางธรรมชาติ [Studies of sisal fiber reinforced natural rubber-modified epoxy resin] นี้ ได้รับ  
ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความร่วมมือและสนับสนุนจากผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวณัฐกฤตา  
ประเสริฐ โสภานและนางสาวสาวิตรี ศรีสุวรรณ นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปราณี หุมสำโรง

พฤษภาคม 2556



## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาถึงการเพิ่มความเหนียวให้กับอีพอกซีเรซิน โดยใช้ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล และยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์เป็นสารเพิ่มความเหนียว ยางธรรมชาติต้องผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลเพราะยางจำเป็นต้องกระจายตัวระดับโมเลกุลในอีพอกซีเรซิน จากการตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่องเจลเพอร์มีเอเบิล โครมาโตกราฟฟี (GPC) พบว่า น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล มีค่าเป็น 55,984 กรัม/โมล และ 2.420 ตามลำดับ

ในกระบวนการกราฟท์ใช้มอนอเมอร์ผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลต (MMA) และไกลซิซิล-เมทาคริเลต (GMA) ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 90/10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปัจจัยที่ศึกษาในกระบวนการกราฟท์ คือ ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และปริมาณของมอนอเมอร์ผสมที่มีต่อองศาการกราฟท์ จากการตรวจสอบด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี พบว่า เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ให้องศาการกราฟท์สูงกว่าเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไครด์ (AIBN) แต่ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและผ่านการกราฟท์ด้วย BPO ไม่ละลายในอีพอกซีเรซิน AIBN ให้องศาการกราฟท์สูงสุดเมื่อใช้ในปริมาณเท่ากับ 2 ส่วนใน 100 ส่วน (phr) ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล และองศาการกราฟท์เพิ่มขึ้นตามปริมาณมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น จากการตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ พบว่า น้ำหนักโมเลกุลลดลงตามปริมาณมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์ทำโดย ทดสอบค่าความทนแรงกระแทกและสมบัติการตัดโค้ง จากผลการทดสอบพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางเท่ากับ 1 phr แสดงค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด ค่ามอดูลัสและค่าความต้านแรงตัดโค้งลดลงตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น และค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ มีค่าสูงกว่าค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ยางซึ่งไม่ผ่านการกราฟท์ และโดยทั่วไปค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มองศาการกราฟท์

การศึกษาเส้นใยป่านสรนารายณ์เสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีและยางธรรมชาติลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เพิ่มความทนแรงกระแทกสูงสุดแก่อีพอกซีนั้น ทำโดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยระหว่าง 3-7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอีพอกซีเรซิน ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการทำแอลคาไลเซชันและที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์คอมโพสิตซึ่งประกอบด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำแอลคาไลเซชันนั้น มีเพียงพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม สำหรับการใส่เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่

ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยसानประสานไซเลน พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทุกอัตราส่วนของเส้นใยสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ค้ำมอดุลัสคัตโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม และมีค่าสูงยิ่งขึ้นสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยसानประสานไซเลน ความต้านแรงคัตโค้งและความเครียดคัตโค้ง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมโพสิตต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสม แต่มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยसानประสานไซเลน



## Abstract

In this research, toughness improvement of epoxy resin was studied by using depolymerized natural rubber (DNR) and grafted depolymerized natural rubber (GDNR) as toughening agent. Natural rubber was depolymerized because rubber need to be initially molecularly dispersed in epoxy resin. The molecular weight and molecular weight distribution of DNR which were characterized using gel permeation chromatography (GPC) were 55,984 g/mol and 2.420, respectively.

In grafting process, monomer mixture of methyl methacrylate (MMA)/glycidyl methacrylate (GMA) in the ratio of 90/10 %wt/wt was employed. The effects of types of initiator, initiator concentration and monomer concentration on the degree of graftization of DNR were investigated. The results from nuclear magnetic resonance spectroscopy showed that benzoyl peroxide (BPO) led to a higher degree of graftization than azo-bis-isobutyronitrile (AIBN). However, GDNR prepared using BPO did not dissolve in epoxy resin. The degree of graftization reached the maximum at 2 phr of AIBN and increased with increasing monomer concentration. The results from GPC showed that molecular weight of GDNR decreased with an increase of monomer concentration.

Mechanical properties of (G)DNR/epoxy resin blends were investigated using impact and flexural tests. The results proved that the blends containing 1 phr of rubber showed the highest impact strength. The flexural modulus and flexural strength decreased with increasing rubber content. In addition, impact strength of GDNR/epoxy resin blends was higher than that of DNR/epoxy resin blends. Generally, impact strength tended to increase with increasing degree of graftization.

The study of sisal fiber reinforced polymer blend of epoxy resin and GDNR that gave the highest impact strength for epoxy resin was carried out by varying the amount of sisal fiber from 3 to 7 %wt of epoxy resin. The sisal fiber was undergone alkalization and alkalization-silane treatment. The results revealed that, for polymer composite containing alkalized sisal fiber, only the composite that contained 7 %wt alkalized sisal fiber possessed a higher impact strength than the blend. In the case of polymer composites containing alkalized and silane treated sisal fiber, it was found that impact strength of all composites was higher than that of the blend. Flexural modulus of all polymer composites was higher than that of the blend and even higher when alkalized and silane treated sisal fiber was used. Flexural strength and flexural strain of polymer

composites were lower than that of the blend but the values tended to increase when alkalized and silane treated sisal fiber was applied.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย .....	ค
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการทำวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ .....	3
<b>บทที่ 2 ความเป็นมาและภูมิหลัง .....</b>	<b>4</b>
2.1 อีพอกซีเรซิน .....	6
2.1.1 ชนิดของอีพอกซีเรซินทางการค้า .....	6
2.1.1.1 ไดโกลซิคลิอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ .....	6
2.1.1.2 บิสฟีนอลเอฟของอีพอกซีเรซิน.....	6
2.1.1.3 ไฮแดนโทอินเรซิน (hydantoin resins).....	7
2.1.1.4 โนวอแล็ก (Novolacs).....	7
2.1.1.5 เปอร์แอซิดเรซิน (peracid resins) .....	8
2.1.2 ลักษณะของอีพอกซีเรซินก่อนเกิดการเชื่อมขวาง.....	8
2.1.2.1 ความหนืด.....	8
2.1.2.2 น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูล (epoxide equivalent weight, EEW)	8
2.1.2.3 ไฮดรอกซิลสมมูล.....	10
2.1.2.4 สี.....	10
2.1.3 สารบ่ม (hardener or curing agent).....	10





## สารบัญ (ต่อ)

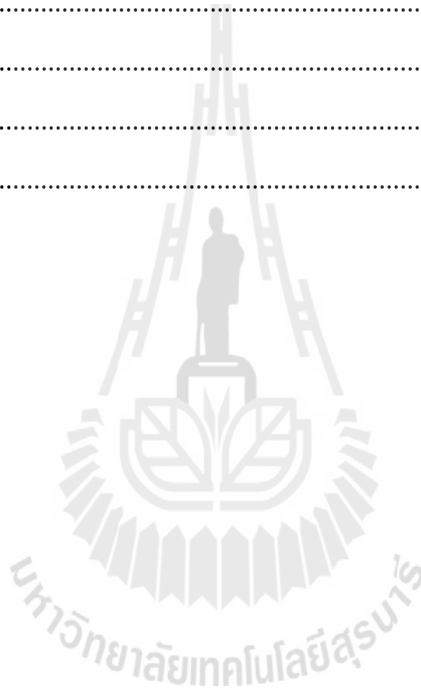
	หน้า	
2.6.1	ค่ามอดุลัสและค่ามอดุลัสจำเพาะของเส้นใยป่านศรนารายณ์.....	29
2.6.2	การใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ ....	29
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>32</b>
3.1	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	32
3.2	วิธีการทดลอง.....	34
3.2.1	การเตรียมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล .....	34
3.2.2	การเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก โมเลกุลกับมอนอเมอร์ผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลตและไกลซีดิล เมทาคริเลต .....	34
3.2.3	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับอีพอกซีเรซิน .....	37
3.2.4	การเตรียมเส้นใยป่านศรนารายณ์.....	38
3.2.4.1	การทำแอลคาไลเซชัน (Alkalization).....	38
3.2.4.2	การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารประสานซิลเลน (Silane Coupling Agents).....	38
3.2.5	การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต .....	39
3.2.6	การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยาง ธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและผ่านการกราฟท์ .....	41
3.2.7	การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ คอมโพสิต .....	41
3.2.8	การตรวจสอบสัณฐานวิทยา .....	42
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....</b>	<b>43</b>
4.1	น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ ที่ลดน้ำหนักโมเลกุล .....	43
4.2	น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ ที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์.....	44
4.2.1	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่าน การกราฟท์.....	44
4.2.2	องศาการกราฟท์.....	48
4.2.2.1	ผลของชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อองศาการกราฟท์.....	49

**สารบัญ (ต่อ)**

	หน้า
4.2.2.2 ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา ต่อองศาการกราฟท์ .....	51
4.2.3 ลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก โมเลกุลซึ่งผ่านการ กราฟท์สำหรับผสมกับอีพอกซีเรซิน .....	52
4.2.3.1 น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้าง โมเลกุลของยางธรรมชาติ ที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์.....	53
4.2.3.2 องศาการกราฟท์ .....	54
4.3 สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	55
4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก โมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	55
4.3.1.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน.....	55
4.3.1.2 สมบัติการตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน.....	56
4.3.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก โมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	60
4.4 สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน .....	62
4.4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก โมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน .....	62
4.4.1.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอี พอกซีเรซิน.....	62
4.4.1.2 สมบัติการตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอี พอกซีเรซิน.....	65
4.4.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก โมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน .....	67

**สารบัญ (ต่อ)**

	หน้า
4.5 สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติกับเส้นใยปานศรนารายณ์ .....	68
4.5.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต .....	69
4.5.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต .....	73
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b> .....	<b>75</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	76
<b>บรรณานุกรม</b> .....	<b>77</b>
<b>ประวัติผู้วิจัย</b> .....	<b>84</b>
<b>เอกสารการตีพิมพ์ผลงานวิจัย</b> .....	<b>88</b>



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณการผลิต การส่งออก การใช้ภายในประเทศและการกักตุนของยางธรรมชาติในประเทศไทยในปีพุทธศักราช 2545-2549 .....	5
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของไกลซิดิลอีเทอร์เรซินทางการค้าบางชนิด.....	9
ตารางที่ 2.3 สารบ่มทางการค้า.....	11
ตารางที่ 2.4 ผลของหมู่ปลายสายโซ่ต่อความสามารถในการเพิ่มความเหนียวของยางบิวทาไดอีน-อะคลิไลโนไครน์.....	27
ตารางที่ 2.5 ค่ามอดูลัสและค่ามอดูลัสจำเพาะของเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญบางชนิดเทียบกับเส้นใยแก้ว .....	29
ตารางที่ 3.1 รายการจำเพาะของน้ำยางธรรมชาติที่มีแอม โมเนียสูง.....	32
ตารางที่ 3.2 ปริมาณของสารที่ปรับเปลี่ยนในการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลตและไกลซิดิลเมทาคริเลต .....	36
ตารางที่ 3.3 ปริมาณของสารต่าง ๆ ที่ใช้ในกรณีเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ในปริมาณที่มากขึ้น .....	36
ตารางที่ 3.4 ชื่อและองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับอีพอกซีเรซิน .....	37
ตารางที่ 3.5 ชื่อและองค์ประกอบของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิต .....	40
ตารางที่ 3.6 จำนวนแผ่นของเส้นใยป่านศรนารายณ์สานในพอลิเมอร์คอมโพสิตของอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติซึ่งลดน้ำหนักโมเลกุลที่ผ่านการกราฟท์ [ยาง 30_2AIBN(L)] .....	41
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล.....	43
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของกราฟท์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ โดยเตรียมจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ....	50
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของกราฟท์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์โดยเตรียมจากเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไครล์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา .....	52
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์ .....	53

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของกราฟที่โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์สำหรับผสมกับอีพอกซีเรซิน .....	55
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	59
ตารางที่ 4.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลที่ปรากฏในพอลิเมอร์ผสม .....	61
ตารางที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน .....	64
ตารางที่ 4.9 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์ที่ปรากฏในพอลิเมอร์ผสม .....	68
ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิตของอีพอกซีเรซิน .....	72

## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของอีพอกซีเรซินชนิดไดโกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ..... 6
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของบิสฟีนอลเอฟของอีพอกซีเรซิน ..... 7
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของไฮแคนโทอินเรซิน..... 7
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของโนโวแล็ก [33]..... 7
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของเปอร์แอซิดเรซิน [33]..... 8
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ..... 12
รูปที่ 2.7	สูตรโมเลกุลของยางบิวทาไดอิน-อะคลิโลไนไตร์ซึ่งมีหมู่วงไวที่ตำแหน่ง ด้านปลายแทนด้วย X ..... 21
รูปที่ 2.8	โครงสร้างทางเคมีของพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์- บอกซิล..... 21
รูปที่ 2.9	สูตรโครงสร้างของยางเหลวของอะคริเลตที่มีกิ่งเป็นหมู่อีพอกซี [53] ..... 21
รูปที่ 2.10	โครงสร้างทางเคมีของ PCPMS-co-PDMS ..... 22
รูปที่ 2.11	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทาไดอินที่ปลายสายโซ่เป็นไฮดรอกซิล [17] ..... 22
รูปที่ 2.12	โครงสร้างทางเคมีของ ยางธรรมชาติถูกอีพอกซีไคซ์ [26]..... 22
รูปที่ 2.13	โครงสร้างทางเคมีของ MDPR [27] ..... 23
รูปที่ 2.14	ไดอะแกรมของแถบเนียน (shear band) ..... 23
รูปที่ 2.15	ไดอะแกรมของการราน (crazing) [55] ..... 24
รูปที่ 2.16	ไดอะแกรมการเกิดโพรงในอนุภาคยาง (rubber cavitation) [55] ..... 24
รูปที่ 2.17	ลักษณะของต้นป่านสรนารายณ์ ..... 28
รูปที่ 2.18	ปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านสรนารายณ์ ..... 28
รูปที่ 3.1	โครงสร้างทางเคมีของเมทิลเมทาคริเลตและโกลซิดิลเมทาคริเลต ..... 33
รูปที่ 3.2	โครงสร้างทางเคมีของเอโซบิสไอโซบิวทิลโรไนไตรล์และเบนโซอิลเปอร์ ออกไซด์..... 33
รูปที่ 3.3	โครงสร้างทางเคมีของ $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilane (A-187)..... 34
รูปที่ 3.4	เส้นใยป่านสรนารายณ์สานแบบตาข่ายขนาด 1x1 เซนติเมตร ..... 38
รูปที่ 3.5	พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์และอีพอกซีเรซินที่ ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ ..... 39

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.6	ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านครนารายณ์และอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ.....	40
รูปที่ 4.1	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (a) และยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล (b) .....	44
รูปที่ 4.2	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (a) และยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์และ (b) ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล .....	45
รูปที่ 4.3	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์; (a) 75_1AIBN, (b) 75_2AIBN และ (c) 75_3AIBN.....	46
รูปที่ 4.4	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ ; (a) 20_2AIBN, (b) 30_2AIBN และ (c) 50_2AIBN และ (d) 75_2AIBN.....	47
รูปที่ 4.5	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์; (a) 50_2AIBN และ (b) 50_2BPO .....	48
รูปที่ 4.6	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ 50_2AIBN.....	49
รูปที่ 4.7	แผนภาพการแตกตัวของ (a) เอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์ และ (b) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ .....	50
รูปที่ 4.8	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์; (a) 20_2AIBN(L), (b) 30_2AIBN(L) และ (c) 50_2AIBN(L) .....	54
รูปที่ 4.9	ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทซ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน.....	56
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดัดโค้งของอีพอกซีบริสุทซ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน.....	57
รูปที่ 4.11	ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด (flexural strain at break, %) ของอีพอกซีบริสุทซ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	57
รูปที่ 4.12	ความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทซ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	58



**สารบัญญภาพ (ต่อ)**

	หน้า
รูปที่ 4.13 มอดูลัสตัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน.....	58
รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน .....	60
รูปที่ 4.15 ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน ; (a) Neat epoxy, (b) 1_DNR, (c) 1_20_2AIBN(L), (d) 1_30_2AIBN(L) และ (e) 1_50_2AIBN(L).....	62
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตัดโค้งของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน .....	65
รูปที่ 4.17 ความเครียดตัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซี ; (a) Neat epoxy, (b) 1_DNR, (c) 1_20_2AIBN(L), d) 1_30_2AIBN(L) และ (e) 1_50_2AIBN(L) .....	65
รูปที่ 4.18 มอดูลัสตัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซี; (a) Neat epoxy, (b) 1_DNR, (c) 1_20_2AIBN(L), d) 1_30_2AIBN(L) และ (e) 1_50_2AIBN(L) .....	66
รูปที่ 4.19 ความต้านแรงตัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซี ; (a) Neat epoxy, (b) 1_DNR, (c) 1_20_2AIBN(L), d) 1_30_2AIBN(L) และ (e) 1_50_2AIBN(L) .....	66
รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน (ลูกศรแสดงอนุภาคยาง) .....	67

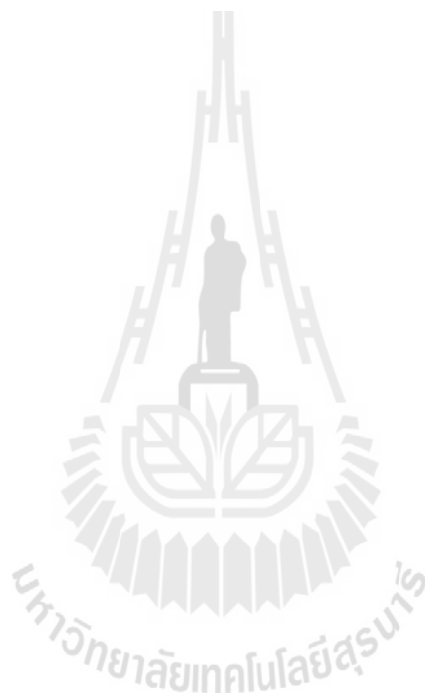
สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite_3% A-sisal (d) Composite_5% A-sisal (e) Composite_7% A-sisal (f) Composite_3% silane-A-sisal (g) Composite_5% silane-A-sisal (h) Composite_7% silane-A-sisal.....	69
รูปที่ 4.22 มอดูลัสตัดโค้งของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite_3% A-sisal (d) Composite_5% A-sisal (e) Composite_7% A-sisal (f) Composite_3% silane-A-sisal (g) Composite_5% silane-A-sisal (h) Composite_7% silane-A-sisal.....	70
รูปที่ 4.23 ความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite_3% A-sisal (d) Composite_5% A-sisal (e) Composite_7% A-sisal (f) Composite_3% silane-A-sisal (g) Composite_5% silane-A-sisal (h) Composite_7% silane-A-sisal.....	70
รูปที่ 4.24 ความเครียดแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite_3% A-sisal (d) Composite_5% A-sisal (e) Composite_7% A-sisal (f) Composite_3% silane-A-sisal (g) Composite_5% silane-A-sisal (h) Composite_7% silane-A-sisal.....	71
รูปที่ 4.25 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิต (ถูกสรแสดงอนุภาคยาง).....	73

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

<b>%wt</b>	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
<b>%wt/wt</b>	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก
<b>AIBN</b>	=	เอโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (Azo-bis-isobutyronitrile)
<b>BPO</b>	=	เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide)
<b>DNR</b>	=	ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล
<b>GDNR</b>	=	ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์
<b>MMA</b>	=	เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate)
<b>GMA</b>	=	ไกลซิديلเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate)
<b>GPC</b>	=	เจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี
<b><sup>1</sup>H-NMR</b>	=	โปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกโตรสโกปี
<b>M<sub>w</sub></b>	=	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก
<b>MWD</b>	=	การกระจายน้ำหนักโมเลกุล
<b>phr</b>	=	ส่วนในร้อยส่วนของเรซิน (Parts per hundred resin)
<b>SEM</b>	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
<b>30_2AIBN(L)</b>	=	ตัวอย่างการตั้งชื่อ GDNR ซึ่งมีความหมายดังนี้ เลข '30' แสดงปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้ในการกราฟท์ต่อปริมาณยาง 100 ส่วน เลข '2' แสดงปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ต่อปริมาณยาง 100 ส่วน อักษรย่อ 'AIBN' แสดงชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ และอักษร 'L' แสดงปริมาณการสังเคราะห์ในระดับที่มากขึ้นกว่าปกติ ถ้าปริมาณการสังเคราะห์ปกติจะละอักษรนี้ไว้
<b>1_DNR</b>	=	ตัวอย่างการตั้งชื่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล โดยเลข '1' แทนปริมาณของ DNR ที่ใช้ในหน่วย phr.
<b>1_20_2AIBN(L)</b>	=	ตัวอย่างการตั้งชื่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ เลข '1' แสดงปริมาณของ GDNR ที่ใช้ในหน่วย phr สัญลักษณ์ '20_2AIBN(L)' แสดงชนิดของ GDNR ในพอลิเมอร์ผสม.
<b>Composite_3% A-sisal</b>	=	ตัวอย่างการตั้งชื่อพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับพอลิเมอร์ผสมของอีพอกซีเรซินและยางชนิดที่ 1 ให้ค่า

ความทนแรงกระแทกสูงสุดแก่อีพอกซี โดย '3%' แสดงปริมาณ  
เส้นใยในคอมโพสิต และ 'A-sisal' แสดง ชนิดของเส้นใยที่ใช้เป็น  
ชนิดที่ผ่านการทำแอลคาไลเซชันเพียงอย่างเดียว ถ้าเส้นใยเป็นชนิด  
ที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสาร  
ประสานไซเลน จะแทนด้วย 'silane-A-sisal'



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการทำวิจัย

ประเทศไทยมีความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้หลากหลาย ซึ่งผลิตผลบางกลุ่มสามารถนำไปใช้ในทางด้านวัสดุศาสตร์ เช่น แป้งจากมันสำปะหลังที่มีนักวิจัยนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ [1] ยางพาราหรือยางธรรมชาติ และเส้นใยจากพืชจำพวกปอ ป่าน ซึ่งต่างประเทศมีความพยายามที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ [2] เพื่อเพิ่มความหลากหลายในการใช้ รวมทั้งส่งเสริมการเพิ่มมูลค่าให้ผลผลิตทางการเกษตร คณะผู้วิจัยจึงมุ่งที่จะศึกษาวิจัยถึงโอกาสการใช้ยางธรรมชาติและเส้นใยพืชในการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิต

ยางธรรมชาติมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น มีความยืดหยุ่นสูง (high resilience) มีความอ่อนตัวดีเยี่ยม (excellent flexibility) ความแข็งแรงดี (good tensile strength) มีความทนแรงกระแทก (resistance to impact) และยังเป็นวัสดุที่ปลูกทดแทนได้ [3] จากข้อดีที่กล่าวไป ทำให้ยางธรรมชาติถูกจัดเป็นอีลาสโตเมอร์ที่สำคัญ นอกจากนี้ยังมีการพยายามศึกษาถึงการใชยางธรรมชาติเป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวต่ำ (low toughness) อาทิเช่น อีพอกซีเรซิน [4] พอลิสไตรีน [5] และพอลิแลคติกแอซิด [6] เป็นต้น และสำหรับกรณีที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและความเหนียวที่สูงเพียงพอก็จะมีการใช้เส้นใยเสริมแรงร่วมด้วยได้เป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งมีเมทริกซ์ที่ผ่านการเพิ่มความเหนียว โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงที่ใ้ใช้มักเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว [7-8] ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดี อย่างไรก็ตาม การใช้เส้นใยสังเคราะห์มีข้อดีหลายอย่าง ได้แก่ ทำให้เครื่องมือขึ้นรูปสึกกร่อน ผลิตจากวัสดุประเภทใช้แล้วหมดไป กำจัดยากเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ใช้พลังงานในการผลิตสูงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน แนวทางหนึ่งที่จะลดปัญหาจากการใช้เส้นใยสังเคราะห์ คือ การใช้เส้นใยธรรมชาติแทน ข้อดีของการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง คือ ราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน (เส้นใยธรรมชาติ \$0.36/kg เส้นใยแก้ว \$3.25/kg เส้นใยคาร์บอน \$11/kg) [9] ไม่ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเครื่องมือขึ้นรูป ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพและความปลอดภัยต่อพนักงานในสถานประกอบการ อีกทั้งหาได้ง่าย และมีความหนาแน่นต่ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา เส้นใยธรรมชาติที่มีการศึกษาวิจัย ได้แก่ เส้นใยจากปอควา (kenaf) ปอกระเจา (jute) ปอแก้ว (rossells) ปอลินิน (flax) กัญชง (hemp) ป่านสรนารายณ์ (sisal) ฝ้าย (cotton) ไม้ไผ่ (bamboo) หญ้าแฝก (vetiver grass) กาบกล้วย (banana bast) ปาล์ม (palm) กาบมะพร้าว (coir) เป็นต้น ซึ่งเส้น

ใยเหล่านี้บางชนิดสามารถหาได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทยแล้วแต่ประเภทและพันธุ์ [10,11,12,13,14]

ในโครงการวิจัยนี้ ระบบที่ศึกษา คือ พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์กับอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ โดยใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ได้จากกลุ่มแม่บ้าน อ.ด่านขุนทด นครราชสีมา เป็นแนวทางเพิ่มประโยชน์การใช้งานและมูลค่าให้กับเส้นใยป่านสรนารายณ์ซึ่งเป็นพืชที่ปลูกมากในจังหวัดนครราชสีมา และมีจุดมุ่งหมายว่า ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่ได้นั้นจะมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวซึ่งสามารถพัฒนามาใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ เมื่อประเทศไทยของเราหันมาวิจัยพัฒนาในด้านนี้ จะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของรายได้ในภาคเกษตรกรรม ทั้งในรูปของการเพิ่มตลาดและการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เกษตร เป็นการลดต้นทุนในการผลิตแก่ภาคอุตสาหกรรม เป็นการรักษาสິงแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะพลาสติกและประหยัดพลังงาน และเป็นแนวทางการพัฒนาประเทศที่ยั่งยืน โดยเน้นการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์ของเส้นใยป่านสรนารายณ์และยางธรรมชาติโดยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์กับอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ โดยมีจุดประสงค์จำเพาะดังนี้

1. เพื่อที่จะทราบผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับอีพอกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ
2. เพื่อที่จะทราบผลการตัดแปรงยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน
3. เพื่อที่จะทราบผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์กับอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต
4. เพื่อที่จะทราบอิทธิพลของการใช้สารประสาน (coupling agent) ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตรวจสอบผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับอีพอกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน
2. ตรวจสอบผลการตัดแปรงยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน
3. ตรวจสอบผลของอัตราส่วนระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์กับอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต

4. ตรวจสอบผลของการใช้สารประสานต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่องานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงคาดว่าจะได้รับประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. ได้องค์ความรู้ที่สามารถพัฒนาต่อและเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าและเพิ่มคุณลักษณะหลายของการใช้งานให้กับป้านครนารายณ์และยางธรรมชาติ โดยมีผลต่อเนื่องในการส่งเสริมอาชีพทางการเกษตรให้เกษตรกรมีรายได้มากขึ้น
2. เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองภายในประเทศจากการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้วัตถุดิบจากทรัพยากรภายในประเทศ
3. เป็นการพัฒนาความสามารถทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
4. เป็นการสร้างและพัฒนาแก่นักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถเริ่มการวิจัยและพัฒนาได้ และดำเนินการวิจัยต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว

#### 1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลงานวิจัยที่ได้จะเป็นความรู้เบื้องต้นที่สามารถนำไปวิจัยและพัฒนาต่อในระดับที่สูงขึ้น ดังนั้น หน่วยงานแรกที่สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ คือ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ โดยใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับโครงการวิจัยในระดับบัณฑิตศึกษา หน่วยงานลำดับต่อมา คือ กลุ่มอุตสาหกรรมพอลิเมอร์คอมโพสิตในการใช้เส้นใยป้านครนารายณ์สำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตในเชิงพาณิชย์

## บทที่ 2

### ความเป็นมาและภูมิหลัง

อีพอกซีเรซินเป็นพอลิเมอร์ที่สำคัญในกลุ่มของพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตซึ่งแสดงสมบัติค่าความต้านแรงดึงและมอดูลัสสูง ทนต่อสารเคมีและมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน การคืบต่ำและมีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงใช้มากในงานยึดติดด้านโครงสร้างพื้นผิว แผ่นประกอบวงจรไฟฟ้า และเมทริกซ์สำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิต อย่างไรก็ตามลักษณะดังกล่าวของอีพอกซีเรซินเกิดจากการเชื่อมขวางปานกลางถึงสูงซึ่งมีผลให้มีพฤติกรรมแบบเปราะ

อีพอกซีเรซินมีพลังงานการแตกหักต่ำโดยทั่วไปน้อยกว่า 200 กิโลจูล/ตารางเมตร [15] ดังนั้นการเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินจึงมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง

การเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินสามารถทำได้โดยใช้ยาง [16-17] เทอร์โมพลาสติกเชิงวิศวกรรม [18] ร่องแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ [19] หรืออนุภาคอินทรีย์ [20] แต่พบว่า การผสมอีพอกซีเรซินกับยางที่มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น พอลิเมอร์ร่วมบิวทาไดอิน-อะครีโลไนไตรล์ที่ปลายโซ่เป็นหมู่คาร์บอกซิล (CTBN) [17] พอลิเมอร์ร่วมบิวทาไดอิน-อะครีโลไนไตรล์ที่ปลายโซ่เป็นหมู่เอมีน (ATBN) [21] และพอลิบิวทาไดอินที่ปลายโซ่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (HTPB) [17] แสดงการเพิ่มความเหนียวได้อย่างชัดเจน

ยางที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ใช้มักอยู่ในรูปยางเหลว [22-23] สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเหลวและอีพอกซี ชั้นแรกของการผสม ยางเหลวต้องสามารถกระจายตัวระดับโมเลกุลในอีพอกซี และแยกตัวออกเมื่ออีพอกซีเกิดการเชื่อมขวาง จากนั้นยางจะอยู่ในรูปของอนุภาคในอีพอกซีเมทริกซ์ ส่วนหมู่ฟังก์ชันเป็นส่วนที่ทำให้การยึดติดระหว่างอนุภาคผิวยางกับเมทริกซ์ดีขึ้น ทำให้การส่งผ่านความเค้นเกิดขึ้นได้ดี ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวของระบบเพิ่มขึ้น

ยางเหลวที่ใช้เพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินโดยทั่วไปมาจากยางสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีการใส่ใจด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นและสิ่งนี้ทำให้มีการเพิ่มระดับความสนใจในยางธรรมชาติและอนุพันธ์ของยางธรรมชาติ โดยสามารถพิจารณาได้จากปริมาณการใช้ยางธรรมชาติในปีพุทธศักราช 2545-2549 ซึ่งแสดงดังตาราง 2.1 [24]

ยางธรรมชาติมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากเพราะเป็นวัสดุที่ปลูกทดแทนได้ ในขณะที่ยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่พบว่า ยางธรรมชาติสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับพอลิเมอร์ [25] และการศึกษาจำนวนมากใช้ยางธรรมชาติเป็นตัวเพิ่มความเหนียวให้แก่อีพอกซีเรซิน [23, 26, 27]



ตารางที่ 2.1 ปริมาณการผลิต การส่งออก การใช้ภายในประเทศและการกักตุนของยางธรรมชาติในประเทศไทยในปีพุทธศักราช 2545-2549

พุทธศักราช	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ปริมาณการส่งออก (ตัน)	ปริมาณการใช้ในประเทศ (ตัน)	ปริมาณการกักตุน (ตัน)
2545	2,615,104	2,354,416	278,355	196,680
2546	2,876,005	2,573,450	298,699	202,240
2547	2,984,293	2,637,096	318,649	232,560
2548	2,937,158	2,632,398	334,649	204,256
2549	3,136,993	2,771,673	320,885	249,895

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยางที่ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับอีพอกซีจำเป็นต้องกระจายตัวระดับโมเลกุลในอีพอกซีเรซิน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของยางธรรมชาติหรือลดน้ำหนักโมเลกุล การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โอโซโนไลซิส [28] โฟโตไลซิส [29] หรือใช้สารเคมี [30] นอกจากนี้ เพื่อให้การส่งผ่านความเค้นระหว่างยางและเมทริกซ์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ยางจึงควรมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอีพอกซีเมทริกซ์หรือสามารถเพิ่มการยึดติดระหว่างพื้นผิวของอนุภาคยางและเมทริกซ์ การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้ยางธรรมชาติสามารถทำได้ทั้งการอีพอกซีเดชันหรือการกราฟท์ด้วยมอนอเมอร์ชนิดต่าง ๆ โดยเมทิลเมทาคริเลตและมาเลอิกแอนไฮไดรด์มอนอเมอร์มีความนิยมในการนำมาศึกษาบ่อยที่สุด [25,31]

ในงานวิจัยครั้งนี้ ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลถูกเตรียมขึ้นและผ่านการกราฟท์ด้วยมอนอเมอร์ผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate, MMA) และไกลซิديلเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวสำหรับอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมของอีพอกซีเรซินกับยางธรรมชาติที่มีความเหนียวดีที่สุดจะใช้ในการศึกษาถึง ผลการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรนารายณ์ รวมทั้งศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยยางธรรมชาติอีกด้วย

สำหรับบทนี้ จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับอีพอกซีเรซิน ยางธรรมชาติ กระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุลและการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้กับยางธรรมชาติ และการใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์

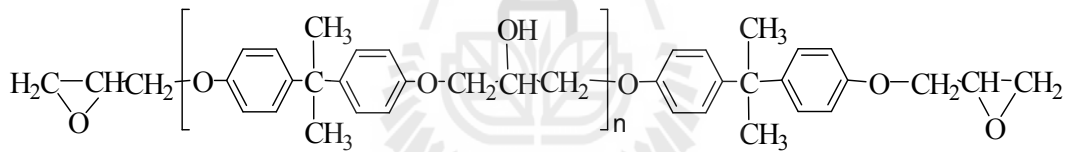
## 2.1 อีพอกซีเรซิน

อีพอกซีเรซินเป็นสารที่มีความว่องไว เมื่อผสมกับสารเคมีอีกชนิดหนึ่งซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่า สารบ่ม (hardener or curing agent) เช่น ไตรเอทิลีนเตตระเอมีน (triethylenetetramine, TETA) และ 4,4'-ไดอะมีโนไดฟีนิลซัลโฟน (4,4'-diaminodiphenylsulfone, DDS) จะได้เป็นผลิตภัณฑ์เทอร์โมเซต ตัวอย่างสำคัญของอีพอกซีเรซินทางการค้าและสารบ่ม มีดังนี้

### 2.1.1 ชนิดของอีพอกซีเรซินทางการค้า

#### 2.1.1.1 ไดไกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (diglycidyl ether of bisphenol A, DGEBA)

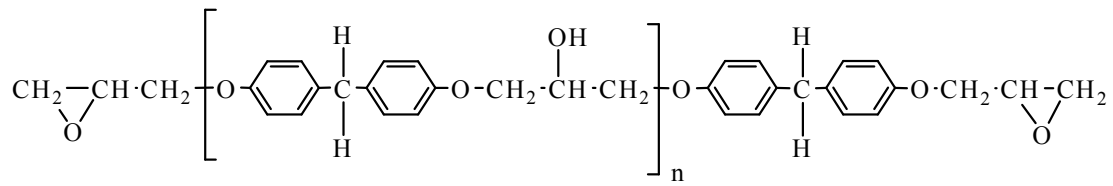
อีพอกซีเรซินที่ใช้กันส่วนใหญ่ คือ ไดไกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (DGEBA) แสดงดังรูปที่ 2.1 สารพวกนี้ถูกผลิตขึ้นโดยปฏิกิริยาของบิสฟีนอลเอและอีพิกลอโรไฮดรินซึ่งมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมอยู่ด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอีพอกซีเรซินชนิดไดไกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ [32]

#### 2.1.1.2 บิสฟีนอลเอฟของอีพอกซีเรซิน (bisphenol F based epoxy resins)

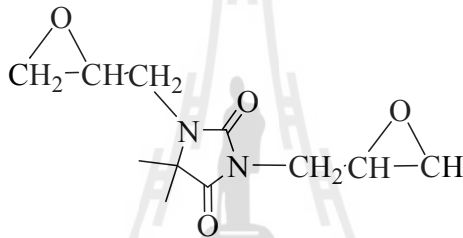
การทำปฏิกิริยาของบิสฟีนอลเอฟกับอีพิกลอโรไฮดรินเพื่อให้เกิดอีพอกซีเรซินเหล่านั้น มีปฏิกิริยาที่คล้ายกัน คือ ปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอฟกับอีพิกลอโรไฮดรินจะได้บิสฟีนอลเอฟของอีพอกซีเรซิน รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของบิสฟีนอลเอฟของอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของบิสฟีนอลเอฟของอีพอกซีเรซิน [32]

### 2.1.1.3 ไฮแดนโทอินเรซิน (hydantoin resins)

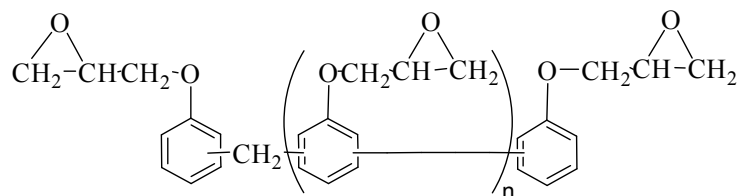
ไฮแดนโทอินเรซิน (รูปที่ 2.3) ได้รับความสนใจมากเนื่องจากมีความทนทาน อุณหภูมิสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม อีพอกซีเรซินชนิดนี้มีปัญหาอย่างหนึ่งคือ ความเป็นพิษ ไฮแดนโทอินที่มีขายตามท้องตลาดจึงต้องมีใบควบคุมการใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไฮแดนโทอินเรซิน [33]

### 2.1.1.4 โนวอแล็ก (Novolacs)

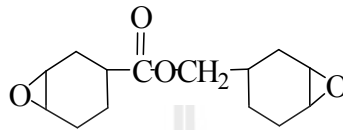
โนวอแล็กเป็นฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ที่ถูกอีพอกซีไดซ์หรือฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ที่ถูกแทนที่ โครงสร้างของโนวอแล็กแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโนวอแล็ก [33]

### 2.1.1.5 เปอร์แอซิดเรซิน (peracid resins)

เปอร์แอซิดเรซินมีลักษณะเป็นวงทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูง เรซินชนิดนี้มีความหนืดและสีค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับ โนโวเล็กและไดโกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ ลักษณะทั่วไปของเรซินชนิดนี้ประกอบด้วยโครงสร้างของ 3,4-อีพอกซีไซโคลเฮกซิลเมทิล-3,4-อีพอกซีไซโคลเฮกเซนคาร์บอกซิลเลตซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเปอร์แอซิดเรซิน [33]

### 2.1.2 ลักษณะของอีพอกซีเรซินก่อนเกิดการเชื่อมขวาง

อีพอกซีเรซินที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ไดโกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอตัดแปร ซึ่งลักษณะของอีพอกซีเรซินก่อนเกิดการเชื่อมขวางมีดังนี้

#### 2.1.2.1 ความหนืด

ความหนืดของอีพอกซีเรซินเป็นสมบัติที่สำคัญที่ควรพิจารณา ซึ่งจะขึ้นกับ อุณหภูมิ น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบทางเคมีของเรซิน ตัวอย่างเช่น การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนืดของเรซินลดลง หรือการมีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ความหนืดของเรซินเพิ่มขึ้น

#### 2.1.2.2 น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูล (epoxide equivalent weight, EEW)

น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูล (EEW) คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของหมู่อีพอกซี โดยค่า EEW จะเท่ากับ น้ำหนักของเรซิน (ในหน่วยกรัม) ที่ประกอบด้วย 1 กรัมสมมูลของหมู่อีพอกซี สำหรับไดโกลซิดิลอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซี 2 หมู่ต่อโมเลกุล น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูลจะเป็นครึ่งหนึ่งของน้ำหนักโมเลกุล (EEW เท่ากับ 170) ตัวอย่างการคำนวณค่าน้ำหนักอีพอกไซด์สมมูลสำหรับไดโกลซิดิลอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซี 2 หมู่ต่อโมเลกุลแสดงดังด้านล่าง

น้ำหนักโมเลกุลของไดโกลซิดีลอีเทอร์

$$21 \text{ คาร์บอน} = 21 \times 12 = 252$$

$$24 \text{ ไฮโดรเจน} = 24 \times 1 = 24$$

$$4 \text{ ออกซิเจน} = 4 \times 16 = 64$$

----

$$\text{น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)} = 340$$

เนื่องจากมีอีพอกไซด์ 2 หมู่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูล} &= \frac{\text{น้ำหนักโมเลกุลของไดโกลซิดีลอีเทอร์บีสฟีนอลเอ}}{\text{จำนวนหมู่อีพอกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยา}} \\ &= \frac{340 \text{ กรัม/โมล}}{2 \text{ กรัมสมมูล/โมล}} \\ &= 170 \text{ กรัม/กรัมสมมูล} \end{aligned}$$

น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูลสามารถคำนวณได้จากปริมาณการทำปฏิกิริยาของเรซินกับกรดไฮโดรคลอริกแล้ววัดปริมาณของกรดที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาโดยการไทเทรตกลับ (back titration) ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูล และจุดหลอมเหลวของโกลซิดีลอีเทอร์เรซินทางการค้าบางชนิด

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของโกลซิดีลอีเทอร์เรซินทางการค้าบางชนิด [34]

เรซิน	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (กรัม/โมล)	น้ำหนักอีพอกไซด์สมมูล	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
A	350-400	175-210	-
B	450	225-290	-
C	700	300-375	40-50
D	950	450-525	64-76
E	1400	870-1025	95-105
F	2900	1650-2050	125-132
G	3800	2400-4000	145-155

### 2.1.2.3 ไฮดรอกซิลสมมูล

ไฮดรอกซิลสมมูลเป็นน้ำหนักของเรซินที่ประกอบด้วยน้ำหนัก 1 กรัมสมมูลของหมู่ไฮดรอกซิล คำนวณได้จากการทำปฏิกิริยาของเรซินกับอะซิติลคลอไรด์ โดยปฏิบัติเหมือนการคำนวณอีพอกไซด์สมมูล

### 2.1.2.4 สี

สีของอีพอกซีเรซินแสดงในหน่วยของคาร์ดเนอร์ คาร์ดเนอร์ 1-5 คือ ไม่มีสี คาร์ดเนอร์ 5-12 คือ สีเหลือง และ คาร์ดเนอร์ 12 ขึ้นไป คือ สีเข้ม (แต่โปร่งแสง)

## 2.1.3 สารบ่ม (hardener or curing agent)

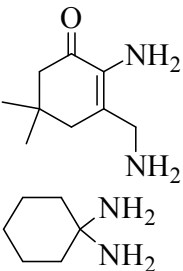
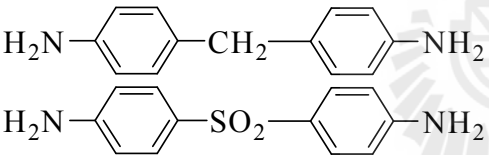
สารบ่มเป็นสารประกอบที่มีความว่องไวทางเคมีซึ่งสามารถเปลี่ยนอีพอกซีเรซินให้เป็นของแข็ง สารนี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางทั้งปฏิกิริยาการเติมหรือโซโม่พอลิเมอไรเซชัน [21] สารบ่มที่ใช้กันทั่วไปสามารถแบ่งได้สี่ประเภท ดังนี้

### 2.1.3.1 สารบ่มชนิดเอมีน (amine curing agents)

เอมีนเป็นสารบ่มที่สำคัญสำหรับอีพอกซีเรซินและสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ เอมีนไฮโดรเจนและอนุพันธ์ กลุ่มนี้เป็นสารที่มีความหนืดต่ำ มีความว่องไวสูงและเกิดการเชื่อมขวางอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง เอมีนไฮโดรเจนส่วนใหญ่ใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธา เช่น วัสดุสำหรับยึดเพื่อซ่อมแซม (patch repair systems) สารยึดติด (adhesives) วัสดุที่ใช้ทำพื้นห้อง (floorings) วัสดุแข็งสำหรับเคลือบผิว (high solid coatings) และปูนยา (grouts) ตัวอย่างของเอมีนไฮโดรเจนคือ เอมีนไฮโดรเจนปฐมภูมิ เช่น ไดเอทิลีนไตรเอมีน (diethylenetriamine, DET) และไตรเอทิลีนเตตราเอมีน (triethylenetetramine, TETA) กลุ่มที่สองประกอบไปด้วย ไฮโคลเอมีนและเทอร์เทียรีเอมีนไฮโดรเจน กลุ่มนี้เป็นสารบ่มที่ใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าพวกอะโรมาติกเอมีนแต่มีประสิทธิภาพและความทนทานต่อสารเคมีสูง สารกลุ่มนี้พบในการใช้งานด้านสารยึดติดและวัสดุสำหรับปกคลุม กลุ่มสุดท้ายคือ อะโรมาติกเอมีน เช่น 4,4'-ไดอะมิโนไดฟีนิลซัลโฟน (4,4'-diaminodiphenylsulfone, DDS) 4,4'-ไดอะมิโนไดฟีนิลมีเทน (4,4'-diamino diphenyl methane, DDM) และเมทาฟีนิลีนไดเอมีน (m-phenylenediamine, MPDA) ซึ่งทำปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซินที่อุณหภูมิสูงและมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน เนื่องจากมีโครงสร้างของวงเบนซีน อะโรมาติกเอมีนใช้ในงานด้านสิ่งทอเชิง-

ประกอบทั้งในรูปแบบเปียกและแห้งสำหรับเส้นใย วัสดุทางไฟฟ้า ท่อน้ำ และชิ้นส่วนต่างๆ ตัวอย่างของสารบ่มทางการค้าแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 3 สารบ่มทางการค้า [35]

สูตรทางเคมี	ชื่อ	ตัวย่อ
เอมีนโชนตรง $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$	ไดเอทิลีนไตรเอมีน ไตรเอทิลีนเตตรามีน	DETA TETA
ไซโคลเอมีน 	ไอโซฟอโรนไดเอมีน 1,2-ไดอะมิโนไซโคลเฮกเซน	IPDA DACH
อะโรมาติกเอมีน 	4,4'-ไดอะมิโนไดฟีนิลมีเทน 4,4'-ไดอะมิโนไดฟีนิลซัลโฟน	DDM DDS

### 2.1.3.2 สารบ่มชนิดกรดแอนไฮไดรด์ (Acid anhydride agents)

กรดแอนไฮไดรด์เป็นที่รู้จักกันดีในกรณีที่เป็นสารบ่มสำหรับอีพอกซีเรซิน เนื่องจากมีลักษณะที่ดี เช่น อายุการใช้งานนาน อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนสูง สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าดี คายความร้อนต่ำในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา แต่ก็มีข้อเสียบางประการคือ ความทนทานต่อแอลคาไลน์ต่ำกว่าระบบที่ใช้สารบ่มชนิดเอมีน กรดแอนไฮไดรด์เป็นสารบ่มที่เป็นอนุพันธ์ของกรดซึ่งสามารถผลิตน้ำออกมาในขั้นตอนการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดฟองในผลิตภัณฑ์

### 2.1.3.3 สารบ่มชนิดกรดลิวอิส (Lewis acid agents)

กรดลิวอิส เช่น โบรอนไตรฟลูออไรด์ในรูปของสารเชิงซ้อนโมโนเอทิลเอมีน (monoethylamine complex:  $\text{BF}_3\text{-MEA}$ ) สามารถใช้เป็นสารบ่มสำหรับอีพอกซี สาร  $\text{BF}_3\text{-MEA}$  มี

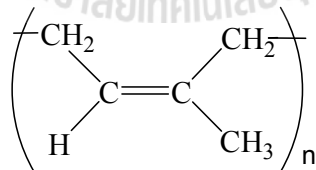
อายุการใช้งานนานและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) สูง ตัวอย่างการผสมของไดโกลซิไดลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอกับ  $BF_3$ -MEA ถึงแม้ว่าความหนืดจะเพิ่มขึ้น แต่ยังสามารถใช้งานได้หลังจากเก็บไว้ 6 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง

#### 2.1.3.4 สารพอลิเอไมด์ (Polyamides)

พอลิเอไมด์เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีราคาถูก มีสีเพียงเล็กน้อยและสามารถผสมได้หลายอัตราส่วน สมบัติเชิงกลดี สามารถกำหนดอายุการใช้งานได้ตามความต้องการ และสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิสูงเล็กน้อย เอไมด์สามารถพิจารณาเป็นกรดคาร์บอกซิลิกที่หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยอนุพันธ์ของแอมโมเนีย โดยทั่วไป พอลิเอไมด์ใช้กับเรซินโกลซิไดลอีเทอร์และบางครั้งใช้กับอีพอกซีไดซ์โอะเลฟิน [36]

## 2.2 ยางธรรมชาติ

พอลิเมอร์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ ยางธรรมชาติ (NR) ซึ่งประกอบด้วย ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (รูปที่ 2.6) อยู่ประมาณ 93-94% น้ำยางธรรมชาติเป็นของเหลวที่ไหลออกมาจากต้นยาง (*Hevea brasiliensis*) ในรูปอิมัลชัน อนุภาคยางมีขนาดตั้งแต่ 50 อังสตรอม จนถึง 30,000 อังสตรอม (3 ไมโครเมตร) ยกเว้นบางครั้งอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5-6 ไมโครเมตร น้ำหนักโมเลกุลปกติอยู่ในช่วง  $10^4$ - $10^7$  กรัม/โมล ขึ้นอยู่กับอายุของต้นยาง สภาพอากาศ กระบวนการแยกน้ำยาง และปัจจัยอื่น ๆ การกระจายน้ำหนักโมเลกุลปกติอยู่ในช่วง 2.5-10 [37]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน

ประโยชน์ของยางธรรมชาติ คือ มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดี และมีความต้านทานเชิงกลสูง นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่ปลูกทดแทนได้ ในขณะที่ยางธรรมชาติสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน [38] ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงได้รับความสนใจเพิ่ม



มากขึ้น ทั้งในรูปของยางธรรมชาติและอนุพันธ์ของยางธรรมชาติ ตัวอย่างการใช้งานยางธรรมชาติมีดังต่อไปนี้

ในปีพุทธศักราช 2547 มีการนำไกลซีดิลเมทาคริเลตและสไตรีนมากราฟท์ลงบนยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากัน (compatibilizer) ได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตสำหรับใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ [39] ในปีพุทธศักราช 2549 มีการสังเคราะห์สารยึดติดจากยางธรรมชาติเพื่อใช้สำหรับทำลู่วิ่งในประเทศไทยด้วยการฉายแสงยูวี [40] เมื่อเร็วๆ นี้มีการทดลองเตรียมน้ำยางธรรมชาติที่มีโปรตีนก่อนภูมิแพ้ต่ำเพื่อใช้ผลิตถุงมือยาง [41]

นอกจากนี้ งานวิจัยมากมายที่สนใจการนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับพอลิเมอร์ ในปีพุทธศักราช 2541 นักวิจัยทำการกราฟท์เมทิลเมทาคริเลตและสไตรีนลงบนยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการอิมัลชัน ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์สามารถใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ [25] ต่อมาปีพุทธศักราช 2549 มีการนำยางธรรมชาติที่ถูกอีพอกซีไดซ์มาใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับอีพอกซีเรซิน ซึ่งส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซินเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับยางธรรมชาติที่ถูกอีพอกซีไดซ์ [26]

ในปีพุทธศักราช 2551 ได้ไกลซีดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอถูกตัดแปรด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและผ่านการกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งพบว่า การเติมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและผ่านการกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในอีพอกซีเรซินทำให้ค่าความเครียดสูงสุด ณ จุดขาด ค่าความเครียดคัต โก้ง ณ จุดขาด และค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น [27]

จากที่กล่าวมาข้างต้น ยางธรรมชาติที่ถูกใช้เพื่อเป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับอีพอกซีเรซิน คือ ยางธรรมชาติที่ถูกอีพอกซีไดซ์หรือยางธรรมชาติที่ถูกลดน้ำหนักโมเลกุล ยางธรรมชาติถูกใช้ในรูปดังกล่าวเนื่องจากต้องมีความเป็นขี้หรือมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพื่อให้สามารถกระจายตัวได้ในอีพอกซีเมทริกซ์

### 2.3 การลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ

การลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำโดยใช้ปฏิกิริยาซึ่งมีสารเคมีที่มีหมู่ว่องไวเปิดพันธะที่ว่องไวบนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ทำให้ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง ยางธรรมชาติที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล เรียกว่า ยางธรรมชาติเหลว (liquid natural rubber or depolymerized natural

rubber; DNR) มีลักษณะเป็นสารยึดติดสูงและมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ขางธรรมชาติที่ถูกลดน้ำหนักโมเลกุลมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น เป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับสารยึดติด สารยึดติดที่มีความว่องไวต่อความดัน วัสดุผนึก สารประกอบอุดรอยร้าว และอื่น ๆ ขางธรรมชาติที่ถูกลดน้ำหนักโมเลกุลกำลังเป็นที่สนใจในภาคอุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับยางก้อน ขางธรรมชาติที่ถูกลดน้ำหนักโมเลกุลมีประโยชน์สำหรับกระบวนการผลิตเนื่องจากง่ายต่อการผลิต และใช้พลังงานน้อย [30]

### 2.3.1 วิธีการลดน้ำหนักโมเลกุล

โดยทั่วไปการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถทำได้โดย การบด (mastication) โฟโตไลซิส (photolysis) การสลายด้วยสารเคมี (chemical decomposition) หรืออื่น ๆ

การบดเป็นวิธีสำหรับเร่งการลดน้ำหนักโมเลกุลโดยการตัดสายโมเลกุลของยางผ่านกระบวนการเชิงกลและความร้อนในเครื่องบดหรือเครื่องบดผสมภายใน จากนั้นจึงเติมสารช่วยย่อย เช่น เมอร์แคปแทน [42]

ในปีพุทธศักราช 2548 มีการใช้วิธีโฟโตไลซิสในการลดความยาวสายโซ่โดยใช้พลังงานแสง ซึ่งพลังงานที่ใช้คือ แสงอุตราไวโอเลต [29] อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ คือ การสลายด้วยสารเคมี วิธีนี้เป็นการสลายสายโซ่โมเลกุลด้วยสารเคมี ในปีพุทธศักราช 2539 มีนักวิจัยได้เสนอกระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ โดยเติมสารประกอบคาร์บอนิลลงไปในน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติที่มีโปรตีนต่ำ แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ โดยเติมอากาศลงไป ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแคบ [30]

### 2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของปฏิกิริยาและการแผ่ขยายของปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการลดน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น

ในปีพุทธศักราช 2543 มีการศึกษาการทำโอโซโนไลซิสยางธรรมชาติ ในลักษณะที่มีปริมาณโปรตีนต่ำและยังไม่ผ่านการเชื่อมขวางในสารละลายเจือจางของคลอโรฟอร์มที่ 0 องศาเซลเซียส พบว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนน้อยกว่า 900 กรัม/โมล เมื่อทำการโอโซโนไลซิส

ผ่านไป 20 นาที [28] และในปีเดียวกันนี้ มีการเตรียมยางธรรมชาติเหลวจากฟีนิลไฮโดรควิโนนและออกซิเจน ผลปรากฏว่า ได้ยางธรรมชาติเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดแปรผันตามปริมาณของฟีนิลไฮโดรควิโนนที่ใช้ และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดต่ำที่สุดเท่ากับ 4,700 กรัม/โมล [43] ในปีพุทธศักราช 2548 มีการศึกษาการสลายทางแสงร่วมกับทางเคมีของยางธรรมชาติโพรตีนต่ำโดยใช้การแผ่รังสีของแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) พบว่า การให้แสงแก่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งของยางธรรมชาติโพรตีนต่ำ บนฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วางบนจานเพาะเชื้อและใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 60 วัตต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีค่าเท่ากับ  $10^4$  กรัม/โมล [29] ในปีพุทธศักราช 2550 มีการสำรวจอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยความร้อนของน้ำยางธรรมชาติ พบว่า เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง [44]

นอกจากนี้ การผสมน้ำยางจากต้นพินทุเมีย (Funtumia) ซึ่งเป็นต้นยางที่พบมากในแอฟริกา กับไนโตรเบนซินซึ่งเป็นสารลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ พบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำยางพินทุเมียในพอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลที่ได้ต่ำลง ผลกระทบของความเข้มข้นของไนโตรเบนซินและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเบนซินและเวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงมากขึ้น [42]

## 2.4 กราฟท์โคพอลิเมอร์เซชันแบบอนุมูลอิสระ (Radical graft copolymerization)

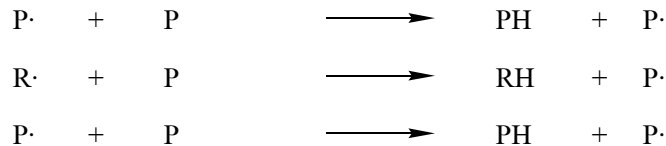
### 2.4.1 การสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์

การสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์โดยพอลิเมอร์เซชันแบบอนุมูลอิสระ สามารถแบ่งตามกระบวนการได้ ดังนี้ การถ่ายโอนโซ่ (chain transfer) และโคพอลิเมอร์เซชัน ริคอกซ์พอลิเมอร์เซชัน กระบวนการฉายรังสีพลังงานสูง และกระบวนการสังเคราะห์โดยใช้แสงร่วมกับทางเคมี [45]

#### 2.4.1.1 การถ่ายโอนโซ่และโคพอลิเมอร์เซชัน

ในกระบวนการพอลิเมอร์เซชันแบบอนุมูลอิสระ การถ่ายโอนโซ่เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ ซึ่งอาจเกิดการถ่ายโอนโซ่สู่มอนอเมอร์ ตัวทำละลาย เมอร์แคปแทนหรือโซ่ที่กำลัง

แผ่ขยาย เมื่อปฏิกิริยาการถ่ายโอน โชนโซ่เกิดขึ้นทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งเป็นศูนย์กลางที่ทำให้เกิดการแผ่ขยายสายโซ่ และการกราฟท์ ลักษณะการถ่ายโอน โชนโซ่แล้วเกิดศูนย์กลางว่องไวต่อปฏิกิริยาการกราฟท์แสดงได้ดังนี้



การเกิดปฏิกิริยาเริ่มจาก การถ่ายโอนของไฮโดรเจนหรือฮาโลเจนอะตอม (ในกรณีของฮาโลเจนพอลิเมอร์) จากโมเลกุลพอลิเมอร์ (P) ไปสู่สายโซ่ที่กำลังเติบโต P· (หรือไปสู่อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มากเกินพอ R· ซึ่งมีผลให้อนุมูลอิสระนั้นสิ้นสุดลง) ศูนย์ว่องไวต่อปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นบนโมเลกุลที่ถ่ายโอนอะตอมไปและเป็นจุดเริ่มของปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน กล่าวคือ มอนอเมอร์ชนิดที่สองที่เติมลงไปจะเกิดปฏิกิริยาตรงศูนย์กลางว่องไวต่อปฏิกิริยาแล้วเกิดการแผ่ขยายของสายโซ่ ปฏิกิริยาการกราฟท์ลักษณะนี้จะเกิดกับระบบที่เป็นมอนอเมอร์-พอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะที่ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และความเข้มข้นของพอลิเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยามีค่าสูง

เทคนิคที่ง่ายที่สุดสำหรับการเกิดปฏิกิริยาดังที่กล่าวไป คือ ละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย แล้วเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะดึงอนุมูลอิสระไฮโดรเจนและทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่พอลิเมอร์ หลังจากนั้นเติมมอนอเมอร์ที่ใช้สำหรับการกราฟท์เข้าไปบนสายโซ่ เทคนิคนี้ใช้ในการกราฟท์เมทิลเมทาคริเลตลงบนยางธรรมชาติและไอโซพรีนสังเคราะห์ [45]

#### 2.4.1.2 รีดอกซ์พอลิเมอร์ไรเซชัน

รีดอกซ์พอลิเมอร์ไรเซชันเป็นเทคนิคที่นิยมมากเทคนิคหนึ่งสำหรับปฏิกิริยาการกราฟท์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน และรีดักชันของซีริกไอออน ในรีดอกซ์พอลิเมอร์ไรเซชัน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์หรือหมู่ที่คล้ายกันถูกลดรูปเป็นอนุมูลอิสระที่มีประจุลบ ขณะที่ไอออนของโลหะถูกออกซิไดซ์ให้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนสูงขึ้น และในขณะเดียวกันนี้มอนอเมอร์ถูกเติมเข้าไป เมื่อหมู่ที่ถูกรีดิวซ์เข้าจับกับสายโซ่พอลิเมอร์ อนุมูลอิสระจะเกิดขึ้นบนสายโซ่พอลิเมอร์และเกิดปฏิกิริยาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันขึ้น ณ ตำแหน่งดังกล่าว [45]

### 2.4.1.3 กระบวนการฉายรังสีพลังงานสูง

ในขณะที่ฉายรังสีพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงภายใต้สุญญากาศ เช่น โคบอลต์-60 ไปบนยางธรรมชาติและพอลิไอโซพรีนชนิดอื่น ๆ สายโซ่หลักจะเกิดการเสื่อมสลาย (degradation) และในขณะเดียวกันพลังงานจากการฉายรังสีอีกส่วนจะถูกดูดซับไปใช้ในการย้ายอะตอมของไฮโดรเจนออกจากสายโซ่หลัก

การฉายรังสีให้แก่ยางธรรมชาติซึ่งมีไวตามินเอหรืออยู่ด้วยนั้น โดยเบื้องต้นแล้วจะทำให้เกิดการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ขึ้น แต่ยังพบว่า มีบล็อกโคพอลิเมอร์เกิดขึ้นด้วยเสมอ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ที่ใช้การฉายรังสีพลังงานสูงสามารถทำได้ทั้งในพอลิเมอร์เชิงเส้นแบบสารละลาย แบบอิมัลชันและแบบแขวนลอย [45]

### 2.4.1.4 กระบวนการสังเคราะห์โดยใช้แสงเหนี่ยวนำปฏิกิริยาเคมี (Photochemical synthesis)

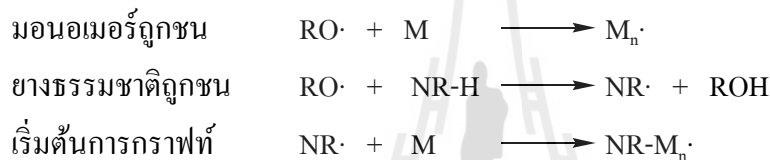
โมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีหมู่วงไวต่อแสงเมื่อดูดซับพลังงานจากคลื่นความถี่ย่านอัลตราไวโอเลตมักจะเกิดการแตกสลายโดยกระบวนการแบบอนุมูลอิสระ โดยปกติกระบวนการแตกสลายดังกล่าวมักเกิดในอัตราที่ช้า แต่หากมีการเติมสารที่วงไวต่อแสง เช่น ซานโทน (xanthone) เบนซิล (benzyl) เบนโซอิน (benzoin) และ 1-คลอโรแอนทราควิโนน (1-chloroanthraquinone) อัตราการเสื่อมสลายจะเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์เชิงเส้นกับเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์หรือมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ ในกรณีของยางธรรมชาติในสถานะน้ำยางสามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่สูงได้ การเตรียมยางธรรมชาติกราฟท์พอลิสไตรีนและพอลิบิวทาไดอีนกราฟท์สไตรีนทั้งสองชนิด สามารถเตรียมได้จากการฉายแสงอัลตราไวโอเลตของมอนอเมอร์ที่กระจายตัวในน้ำยาง การสังเคราะห์โดยใช้แสงร่วมกับการเริ่มต้นปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์สามารถทำได้เช่นเดียวกัน กระบวนการนี้ เรียกว่า การออกซิเดชัน 1 อีเล็กตรอน มีผลให้ปฏิกิริยาการกราฟท์เกิดขึ้นพร้อมกับลดการเกิดไฮโดรพอลิเมอร์ลง [45]

### 2.4.2 กราฟท์โคพอลิเมอร์เชิงเส้นของยางธรรมชาติ

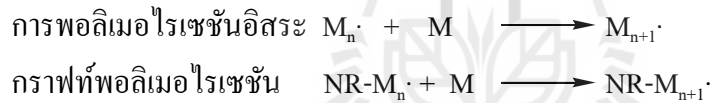
จากที่กล่าวมาข้างต้น ยางธรรมชาติแสดงสมบัติเชิงกลที่ดีรวมถึงมีความยืดหยุ่นและความต้านทานความล้าสูง นอกจากนี้ยังมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้ แต่อย่างไรก็ตาม

ตาม ขางธรรมชาติมีความทนต่อโอโซน การออกซิเดชัน สภาพอากาศ และตัวทำละลายต่ำ เนื่องจากความไม่อึดตัวและความไม่มีขั้วของสายโซ่ยางธรรมชาติ จึงมีการพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้สามารถใช้งานที่หลากหลายขึ้น ตัวอย่างเทคนิคการตัดแปรงยางธรรมชาติ ได้แก่ การทำไฮโดรคลอรีเนชัน [46] การทำอีพอกซิเดชัน [40] การกราฟท์ [27] ในทางปฏิบัติวิธีปรับปรุงสมบัติของยางที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การกราฟท์ด้วยพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงบนสายโซ่หลักของยางธรรมชาติ ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการกราฟท์โดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับอนุมูลอิสระซึ่งสามารถใช้กับพอลิเมอร์และมอนอเมอร์ได้หลายชนิด [27,47,48] กลไกการกราฟท์มอนอเมอร์ลงไปบนสายโซ่ของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังนี้

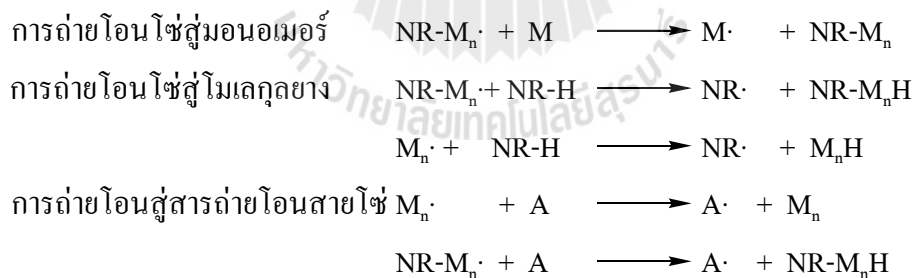
#### ขั้นเริ่มต้น



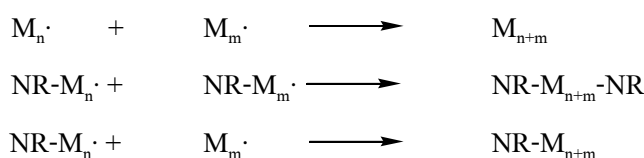
#### ขั้นแผ่ขยาย



#### การถ่ายโอนโซ่สู่โมเลกุลใหญ่



#### ขั้นสิ้นสุดแบบรวมตัว



ณ ที่นี้ RO· หมายถึงอนุมูลอิสระเริ่มต้น M และ M<sub>n</sub>· เป็นมอนอเมอร์และอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์ NR NR· และ NR-M<sub>m</sub>· เป็นพอลิไอโซพรีน อนุมูลอิสระพอลิไอโซพรีนและพอลิไอโซพรีนที่ถูกกราฟท์ A และ A· เป็นสารถ่ายโอนโซ่และอนุมูลอิสระของสารถ่ายโอนโซ่

การกราฟท์ส่วนใหญ่ใช้ไวโนลมอนิเมอร์ เช่น เมทิลเมทาคริเลตและสไตรีน [25] ปริมาณมอนอเมอร์ที่ถูกกราฟท์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติมีผลมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา เวลาและอุณหภูมิของปฏิกิริยา

จากผลการศึกษาด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี พบว่า การกราฟท์ไคเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตลงบนยางธรรมชาติจะเกิดขึ้นเมื่อ ปริมาณของไคเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณของการกราฟท์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของไคเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [48] ปริมาณการกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา การเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นสาเหตุของการเพิ่มปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกกราฟท์ลงบนยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยามากกว่า 3 ส่วนในร้อยส่วน ที่อุณหภูมิมากกว่า 80 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 2 ชั่วโมง เป็นสาเหตุของการเพิ่มระดับของสัดส่วนเจลในกราฟท์โคพอลิเมอร์ [31]

การศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติโปรตีนต่ำและยางธรรมชาติที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงกับเมทิลเมทาคริเลต พบว่า ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟท์เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นและโมเลกุลยางธรรมชาติอิสระมีน้อยลง ในระบบการกราฟท์ที่ใช้ยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ ระดับการกราฟท์พอลิเมทิลเมทาคริเลตสำหรับกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้จากยางธรรมชาติโปรตีนต่ำสูงกว่าระบบของกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้จากยางธรรมชาติที่มีปริมาณแอมโมเนียสูง แสดงให้เห็นว่าโปรตีนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุโมลติส [38]

การศึกษาการกราฟท์เมทิลเมทาคริเลตและสไตรีนลงบนยางธรรมชาติโดยการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันแกนและเปลือก (core-shell emulsion polymerization) เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ สภาวะที่เหมาะสมของการกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน คือ ใช้มอนอเมอร์ 100 ส่วนในร้อยส่วน โดยน้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติ ใช้ตัวกระจายเนื้อเดียวกัน (emulsifier) 1.5 ส่วนในร้อยส่วน ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 1.5 ส่วนในร้อยส่วน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลผลิตของยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์สามารถใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยทำเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์โดยการผสมเชิงกลและขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด ผลผลิตที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีเมื่อใช้ปริมาณของยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์เท่ากับ 10 และ 15 ส่วนในร้อยส่วน [25]

สำหรับระบบการกราฟท์ของไกลซิดิลเมทาคริเลตและสไตรีนกับยางธรรมชาติ โดยวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน ใช้ควิมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์และเตตระเอทิลลิทเทเนียมเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ มีการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาและมอนอเมอร์ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกราฟท์และการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์

(monomer conversion) พบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันคือ ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 2.5 ส่วนในร้อยส่วน ความเข้มข้นมอนอเมอร์ 100 ส่วนในร้อยส่วน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ปริมาณการเปลี่ยนมอนอเมอร์ภายใต้สภาวะนี้เท่ากับ 69.3 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการกราฟท์เท่ากับ 69.3 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy) แสดงให้เห็นว่า ขาธรรมชาติที่ถูกกราฟท์มีลักษณะของแกนและเปลือกของโคพอลิเมอร์สไตรีนและไกลซิดิลเมทาคริเลตรอบแกนที่สมบูรณ์ของแต่ละอนุภาคยาง ผลิตภัณฑ์ของขาธรรมชาติที่ถูกกราฟท์ (NR-g-ST/GMA) ถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต แสดงการยึดติดของพื้นผิวที่ดีขึ้น [39]

การศึกษากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลตบนน้ำยางธรรมชาติโดยการฉายรังสีแกมมาสำหรับเพิ่มสมบัติเชิงกลของฟิล์มแห้ง พบว่า โมดูลัสของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเมทิลเมทาคริเลต แต่ค่าความต้านแรงดึงลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าโมดูลัสที่สูงแต่ไม่มีการลดลงของความต้านแรงดึงพบได้เมื่อ ใช้ปริมาณเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 50-60 ส่วนในร้อยส่วน [49]

Derouet และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียม กราฟท์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับไดเมทิลอะคริโรอิลออกซีเมทิลฟอสฟอเนต (NR-g-PDMAMP) และยางธรรมชาติกับไดเมทิลเมทาคริโรอิลออกซีเอทิลฟอสฟอเนต (NR-g-PDMMEP) ด้วยการพอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้แสงในน้ำยาง พบว่า การอัตราการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์และอัตราการกราฟท์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์และเวลาในการทำปฏิกิริยา [50]

## 2.5 การเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินด้วยยาง

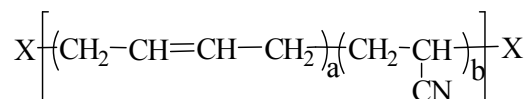
### 2.5.1 ชนิดของยางที่ใช้เพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซิน

ยางที่ใช้สำหรับปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวของอีพอกซีเรซินได้แก่ยางชนิดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในหัวข้อต่อไป



### 2.5.1.1 ยางบิวทาไดอิน-อะคริโลไนไตรล์ชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา

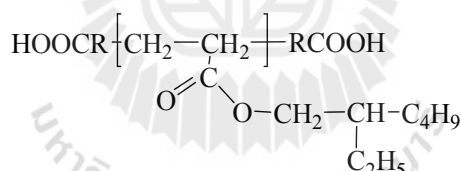
ยางบิวทาไดอิน-อะคริโลไนไตรล์ประกอบด้วยสายโซ่หลักของบิวทาไดอินและอะคริโลไนไตรล์ที่มีหมู่ว่องไวอยู่ที่ตำแหน่งปลายสายโซ่ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งหมู่เอมีนและคาร์บอกซิล ดังแสดงไว้รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโมเลกุลของยางบิวทาไดอิน-อะคริโลไนไตรล์ซึ่งมีหมู่ว่องไวที่ตำแหน่งด้านปลายแทนด้วย X [51]

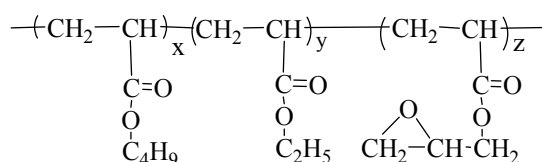
### 2.5.1.2 อะคริเลตอิลาสโตเมอร์ชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา

ในพุทธศักราช 2544 นักวิจัยใช้พอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิล ดังรูปที่ 2.8 เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับอีพอกซี



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิล [52]

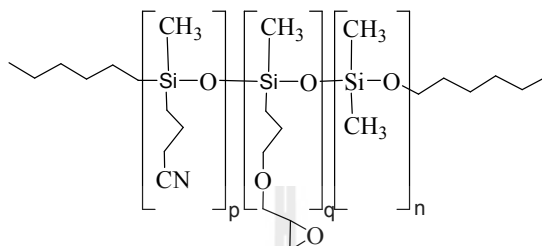
Kong และคณะใช้ยางเหลวของอะคริเลตซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 เพิ่มความเหนียวแก่ไดโกลซิไดลอีเทอร์บิสฟีนอลเอทีใช้ไตรเอทานอลเอมีนเป็นตัวทำแข็ง [53]



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของยางเหลวของอะคริเลตที่มีกิ่งเป็นหมู่อีพอกซี [53]

### 2.5.1.3 พอลิไซล๊อกเซนชนิดวงไวต่อปฏิกิริยา

การเพิ่มสมบัติความเหนียวของโครงร่างแห่อีพอกซีเรซินชนิดโนโวแล็กสามารถทำได้โดยใช้พอลิไซยาโนโพรพิลเมทิลไซล๊อกเซน-พอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนโคพอลิเมอร์ที่อีพอกซีไดซ์ (PCPMS-co-PDMS) รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ (PCPMS-co-PDMS)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ PCPMS-co-PDMS [54]

### 2.5.1.4 ยางพอลิบิวทาไดอินชนิดวงไวต่อปฏิกิริยา

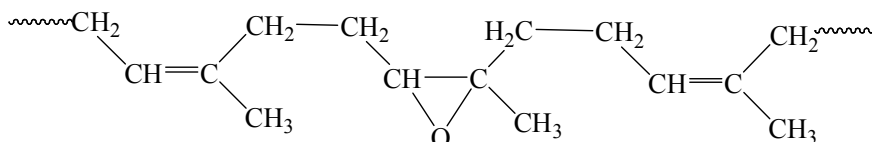
Ramos และคณะ ศึกษาการใช้พอลิบิวทาไดอินที่ปลายสายโซ่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (รูปที่ 2.11) สำหรับเพิ่มความทนแรงกระแทกแก่อีพอกซีเรซิน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทาไดอินที่ปลายสายโซ่เป็นไฮดรอกซิล [17]

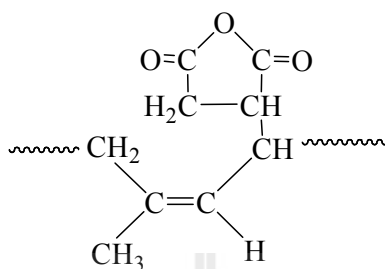
### 2.5.1.5 ยางธรรมชาติดัดแปร

Chuayjuljit และคณะ วิจัยเกี่ยวกับการใช้ยางธรรมชาติที่ผ่านการอีพอกซีไดซ์ (รูปที่ 2.12) โดยใช้เทคนิคอีพอกซีเดชันเป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ [26]

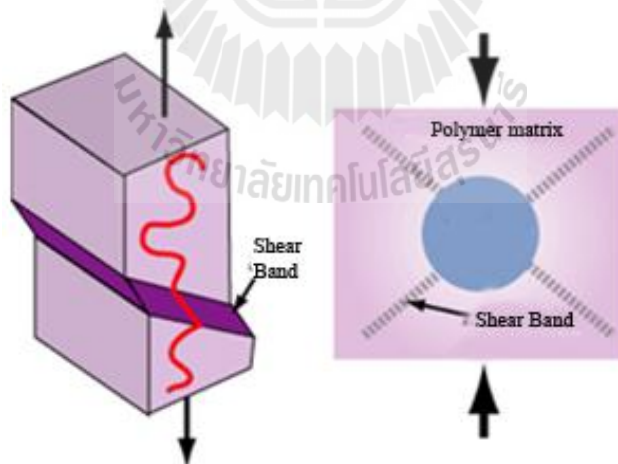
นอกจากนี้ ยังสามารถดัดแปรอีพอกซีเรซินให้มีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยการใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MDPR) ดังรูป 2.13 [27]



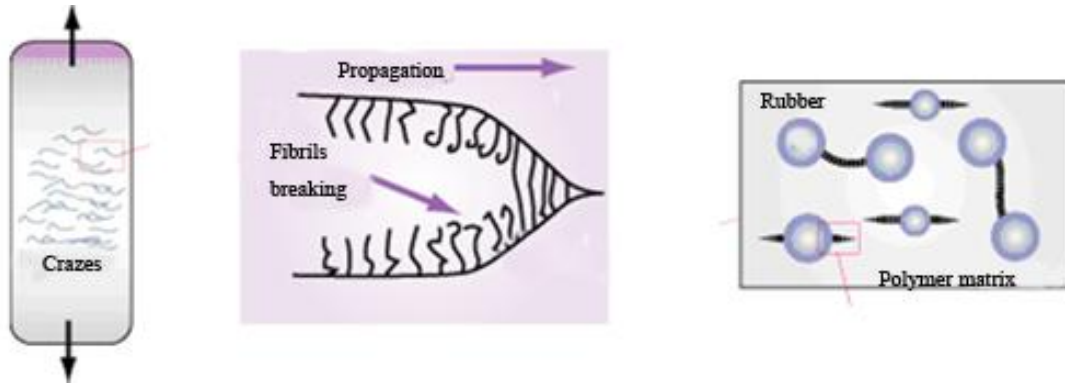
รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของ MDPR [27]

### 2.5.2 กลไกการเพิ่มความเหนียว

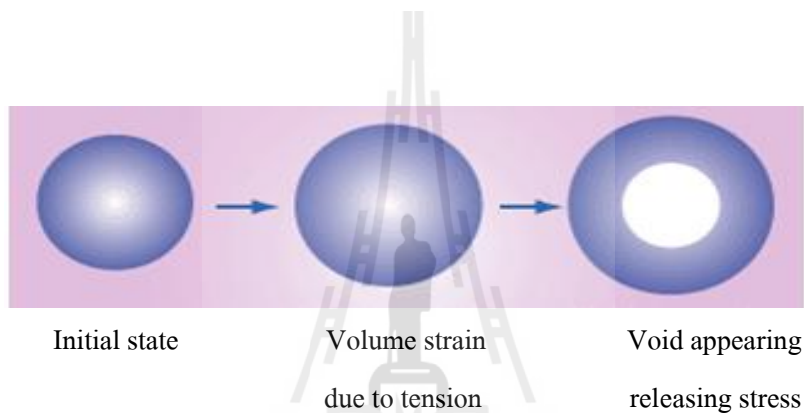
กลไกการเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินประกอบด้วย การรราน (crazing) การยืลด์แบบเฉือน (shear yielding) และการเกิดโพรงในอนุภาคยาง (rubber cavitation) ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.14-2.16 เรียงตามลำดับ



รูปที่ 2.14 ไคอะแกรมของแถบเฉือน (shear band) [55]



รูปที่ 2.15 ไคอะแกรมของการราน (crazing) [55]



รูปที่ 2.16 ไคอะแกรมการเกิดโพรงในอนุภาคยาง (rubber cavitation) [55]

Barcia, Amaral และ Soares [56] ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำของพอลิบิวทาไดอินบลิคโคพอลิเมอร์ดัดแปรอีพอกซีเรซินชนิดไดโกลซิไดลอีเทอร์บิสฟีนอลเอ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า กลไกการเพิ่มความเหนียวสัมพันธ์กับการเกิดโพรงในอนุภาคยาง (cavitation) ที่กระจายอยู่ภายในอีพอกซีเมทริกซ์ และคณะผู้วิจัยได้เสนอแนะตามทฤษฎีของ Bucknall และ Smith (Bucknall and Smith's theory) ว่า อนุภาคยางก่อให้เกิดการราน (craze) และทำหน้าที่ควบคุมการเติบโตของการรานดังกล่าว นอกจากนี้ยังอธิบายถึงผลของความยืดหยุ่น อันเนื่องมาจากยางที่ละลายอยู่ภายในอีพอกซีเมทริกซ์ ซึ่งมีการอธิบายเช่นเดียวกันนี้ในงานวิจัยของ Saadati และคณะ[16]

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและการกระจายอนุภาคของยางต่อกลไกการเพิ่มความเหนียวในอีพอกซีที่ดัดแปรด้วยยาง โดย Peason และ Yee [57] พบว่า ความเหนียวเพิ่มขึ้นโดย

การเกิดโพรงในอนุภาคของยาง ส่งผลให้เกิดแถบเฉือน (shear band) พฤติกรรมคล้ายกันนี้ยังพบในอีพอกซีเรซินซึ่งปรับปรุงด้วยยางอะครีเลตเหลวที่มีหมู่อีพอกซีอีกด้วย โดยอนุภาคยางซึ่งกระจายในอีพอกซีเรซินทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระจายพลังงานเชิงกล ทำให้เกิดโพรงในอนุภาคและเกิดแถบเฉือน (shear band) และปรากฏความเค้นสีขาว (stress whitening) รอบอนุภาคของยาง [53]

เมื่อไม่นานมานี้ มีการใช้ยางอะครีลิกเหลวที่มีหมู่ปลายและสายโซ่กิ่งซึ่งประกอบด้วยหมู่ของคาร์บอกซิล เป็นตัวปรับปรุงอีพอกซีเรซิน ซึ่งมีผลให้ความเหนียวของอีพอกซีเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่ฟังก์ชันของยางเหลวที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันของยางทำให้การยึดติดอนุภาคของยางกับเมทริกซ์สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดโพรงในอนุภาคยางและการเสีรูปร่างแบบพลาสติก (plastic deformation) [58]

ในปีพุทธศักราช 2551 มีการศึกษาถึงกลไกการเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีที่ผสมกับอนุภาคของยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและผ่านการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ผู้วิจัยพบว่า มีการปรากฏของแถบเฉือน (shear band) และการเสีรูปร่างแบบพลาสติกเมื่อมีปริมาณของยางมากพอ และส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น [27]

### 2.5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยาง

ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยาง ได้แก่ ความเข้มข้นของยาง น้ำหนักโมเลกุล ขนาดอนุภาค ระยะห่างระหว่างอนุภาค และสถานะในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (cure conditions)

การศึกษาความเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางบิวทาไดอีน-อะครีโลไนด์ในไดร์ลที่ปลายโซ่เป็นหมู่คาร์บอกซิล (CTBN) และอนุภาคยางที่มีลักษณะวิหยาแบบแกนกับเปลือก (core-shell particle) พบว่า กรณีสี่ขนาดอนุภาคของยางเท่ากัน ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลงเมื่อปริมาณของยางเพิ่มขึ้นนั้น นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความเหนียว และกรณีที่มีปริมาณของยางเท่ากัน ขนาดอนุภาคเล็กให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคที่ต่ำลงและมีความเหนียวสูงขึ้น [59-60]

สำหรับผลของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะครีเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิล ต่อพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะครีเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิลกับอีพอกซี พบว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนของพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะครีเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิล ในช่วง 3,500-7,000 กรัม/โมล แสดงประสิทธิภาพการเพิ่มความเหนียว

ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนของยางเท่ากับ 9,500 กรัม/โมล จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มความเหนียวให้อีพอกซี อาจเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มใหญ่ของอนุภาคยาง [61]

Ratna ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการกระแทกกับสถานะการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิล ในระบบของอีพอกซี-เรซินที่ปรับปรุงด้วยยางเหลว พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีที่ผ่านการปรับปรุงเพิ่มขึ้นช้าๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเชื่อมขวางจนอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่ออุณหภูมิของการเชื่อมขวางเกิน 140 องศาเซลเซียส [52] และพบพฤติกรรมคล้ายกันนี้ในระบบของอีพอกซีที่ปรับปรุงด้วยยางพอลิบิวทาไดอินที่ปลายสายโซ่เป็นไฮดรอกซิล [62]

ในแง่ของอิทธิพลของความเข้มข้นของยางที่ส่งผลต่อความเหนียวของอีพอกซีนั้น มีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพอลิ-2-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิลกับค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าของอีพอกซีบริสุทธิ์ และค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 10 ส่วนในร้อยส่วน มีค่าสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 25.6 จูล/เมตร โดยเพิ่มขึ้น 60% เมื่อเทียบกับอีพอกซีบริสุทธิ์ (16.3 จูล/เมตร) ความเหนียวของอีพอกซีที่ปรับปรุงด้วยบิวทาไดอินอะคริโเลในไตรล์ที่มีปลายสายโซ่เป็นหมู่เอมีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับ 12.5 ส่วนในร้อยส่วน

นอกจากนี้ เป็นที่รู้กันดีว่าความว่องไวและการเลือกจำเพาะ (reactivity and selectivity) ของยาง แสดงบทบาทสำคัญในกระบวนการเพิ่มความเหนียวของอีพอกซี หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนสายโซ่ของยางซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดพันธะทางเคมีกับอีพอกซีเมทริกซ์ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับประสิทธิภาพการส่งผ่านความเค้นระหว่างอนุภาคยางกับเมทริกซ์

ในปีพุทธศักราช 2548 มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพิ่มความทนแรงกระแทกสำหรับอีพอกซีเรซินระหว่างบิวทาไดอิน-อะคริโเลในไตรล์ที่ปลายโซ่เป็นหมู่คาร์บอกซิล (CTBN) และพอลิบิวทาไดอินที่ปลายสายโซ่เป็นไฮดรอกซิล (HTPB) พบว่า CTBN ให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า HTPB จากผลการทดลอง พบว่า ขนาดอนุภาคของยางมีความสัมพันธ์กับยางที่ใช้ โดยขนาดอนุภาคของ CTBN มีขนาดระหว่าง 1-4 ไมโครเมตร ในทางตรงกันข้าม HTPB ที่ใช้ปรับปรุงอีพอกซีเรซินแสดงขนาดอนุภาคใหญ่กว่า โดยอยู่ในช่วง 10-50 ไมโครเมตร ประสิทธิภาพ

การเพิ่มความเหนียวของ HTPB มีน้อยเนื่องมาจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคของ HTPB กับเมทริกซ์ไม่เหมาะสมเพียงพอ [17]

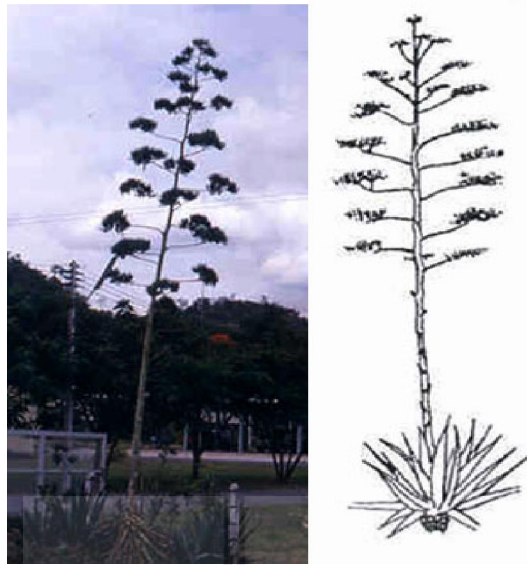
และยังพบว่า โดยทั่วไป ยางที่มีหมู่ปลายสายโซ่เป็นคาร์บอกซิลนั้น สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับอีพอกซีได้ดีกว่ายางที่มีหมู่ปลายสายโซ่ชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 [51]

**ตารางที่ 2.4** ผลของหมู่ปลายสายโซ่ต่อความสามารถในการเพิ่มความเหนียวของยางบิวทาไดอีน-อะครีโลไนไตรล์

ยาง	หมู่ฟังก์ชัน	พลังงานที่ใช้ในการแตกหัก (กิโลจูลต่อตารางเมตร)
CTBN	คาร์บอกซิล	2.8
PTBN	ฟีนอล	2.6-3.0
ETBN	อีพอกซี	1.8-2.5
HTBN	ไฮดรอกซิล	0.9-2.6
MTBN	เมอร์แคปแทน	0.2-0.4

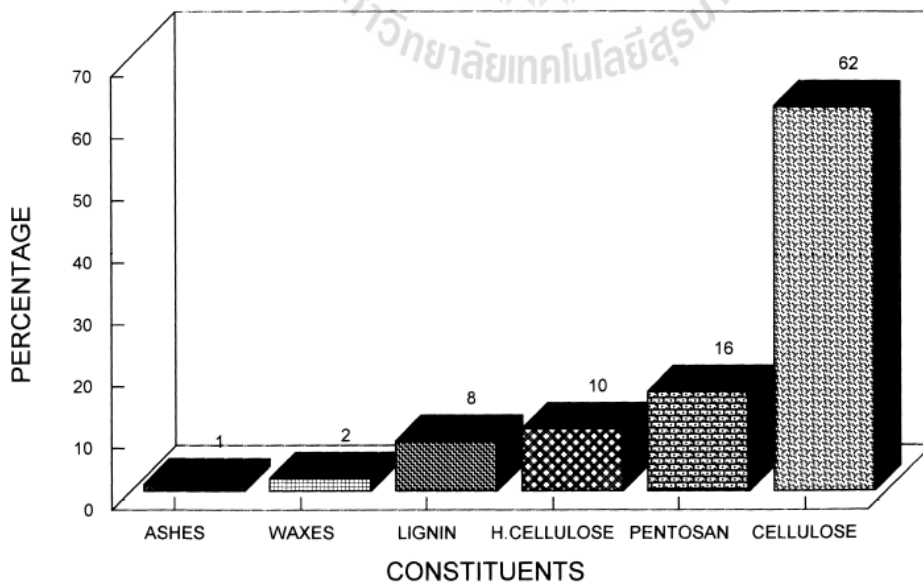
## 2.6 เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal Fiber)

ป่านศรนารายณ์มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า อะกาเว ซิซาลานา (Agave sisalana L) มีลำต้นหนา ปล้องถี่ มีรากอยู่ใต้พื้นดิน (Rhizome) ที่เกิดจากตาตรงมุมใบของลำต้นผิวดิน เจริญในแนวผิวดิน ห่างจากต้นแม่ไปประมาณ 2 เมตร และมีหน่อ (sucker) เกิดขึ้น รากเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) ใบเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว (simple leaf) เกิดเป็นพุ่มแฉ่ (rosette) เวียนรอบลำต้นอย่างหนาแน่น สีเขียวเข้ม มีไข (waxy bloom) คลุมตลอดใบ ปลายใบมีหนามแข็งสีดำ รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของต้นป่านศรนารายณ์ [63]



รูปที่ 2.17 ลักษณะของต้นป่านศรนารายณ์

เส้นใยป่านศรนารายณ์มาจากส่วนใบของต้นป่านศรนารายณ์ ซึ่งองค์ประกอบหลักๆ ทางเคมี คือ เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose), ลิกนิน (Lignin), เพนโทซาน (Pentosan) และ แวกซ์ (Waxes) โดยมีอัตราส่วนตามแผนภูมิในรูปที่ 2.18 ซึ่งคุณภาพของเส้นใยที่ได้จะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของเส้นใยป่านศรนารายณ์ เช่น แหล่งเพาะปลูก, ปริมาณน้ำและอาหารที่พืชได้รับ และอายุของพืช เป็นต้น



รูปที่ 2.18 ปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านศรนารายณ์ [64]



### 2.6.1 ค่ามอดูลัสและค่ามอดูลัสจำเพาะของเส้นใยป่านศรนารายณ์

ตารางที่ 2.5 แสดงค่ามอดูลัสและค่ามอดูลัสจำเพาะของเส้นใยป่านศรนารายณ์เทียบกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ และเส้นใยแก้ว

ตารางที่ 2.5 ค่ามอดูลัสและค่ามอดูลัสจำเพาะของเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญบางชนิดเทียบกับเส้นใยแก้ว [65]

ชนิดของเส้นใย	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	มอดูลัส (GPa)	มอดูลัสจำเพาะ (มอดูลัส/ความหนาแน่น)
เส้นใยแก้ว (E-glass)	2.55	73	29
เส้นใยกัญชง (Hemp)	1.48	70	47
เส้นใยป่านลินิน (Flax)	1.4	60-80	43-57
เส้นใยปอกระเจา (Jute)	1.46	10-30	7-21
เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal)	1.33	38	29
เส้นใยเปลือกลูกมะพร้าว (Coir)	1.25	6	5
เส้นใยฝ้าย (cotton)	1.51	12	8

จากข้อมูลในตารางที่ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยธรรมชาติด้วยกัน จะเห็นได้ว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่ามอดูลัสต่ำกว่าเส้นใยกัญชงและป่านลินินเท่านั้น เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสจำเพาะ พบว่า ป่านศรนารายณ์มีค่าเทียบเท่ากับเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ ป่านศรนารายณ์ยังเป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย ราคาไม่แพง ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงมีผู้สนใจศึกษาการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ [66]

### 2.6.2 การใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์

การใช้ประโยชน์หลักของเส้นใยป่านศรนารายณ์ คือ ใช้ทำเชือกขนาดใหญ่สำหรับลากจูงเรือและใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร [67] ด้วยคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงดังกล่าว จึงมีการศึกษาการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ในการเสริมแรงให้แก่พอลิเมอร์ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกที่มีการศึกษาได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง [68] พอลิโพรพิลีน [69] และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [70] สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดเทอร์โมเซต ได้แก่ อีพอกซีเรซิน ฟีนอลิกเรซิน และพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว [71] แต่เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว เส้นใยธรรมชาติมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้เข้ากันได้ไม่ดีกับพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่

ชอบน้ำ (hydrophobic) เส้นใยป่านสรณารายณ์ก็เช่นเดียวกัน จึงมีการศึกษาถึงการเพิ่มความเข้ากันได้ โดยทำการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ ตัวอย่างของวิธีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย ได้แก่ การทำแอลคาไลเซชัน [72] และการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยโดยใช้สารเคมี [73-74] หรือการเติมสารประสาน (coupling agent) รวมทั้งการเคลือบเส้นใยด้วยพอลิเมอร์ [75] ผลการศึกษาถึงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรณารายณ์เป็นวัสดุเสริมแรงสามารถสรุปได้ดังนี้

Rong และคณะ [76] ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยป่านสรณารายณ์ตามธรรมชาติกับเส้นใยป่านสรณารายณ์ที่ผ่านการทำแอลคาไลเซชัน โดยการต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 % ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ ปริมาณของเส้นใย คณะผู้วิจัยพบว่า พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์มีคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นด้วย และให้ค่าที่ดีขึ้นเมื่อใช้เส้นใยที่ผ่านการทำแอลคาไลเซชัน

Antich และคณะ [77] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์ชนิดสั้นให้กับพอลิสไตรีนชนิดความต้านทานสูง (high impact polystyrene, HIPS) โดยใช้เส้นใยในปริมาณต่างๆ กัน พบว่า การเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์ชนิดสั้นสามารถเพิ่มค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปให้แก่พอลิเมอร์คอมโพสิต แต่มีผลให้ค่าความต้านแรงดึงลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่า การเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์ชนิดสั้นสามารถเพิ่มค่าความทนแรงกระแทกได้สูงสุดที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น

Jacob และคณะ [78] ศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์ โดยมีตัวแปรต่างๆ คือ ปริมาณเส้นใย ความยาวของเส้นใย การทำแอลคาไลเซชันให้กับเส้นใยที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรณารายณ์สามารถเพิ่มค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) ค่าความต้านแรงฉีกขาด (tear strength) และค่ามอดุลัสให้แก่พอลิเมอร์คอมโพสิต แปรผันตามปริมาณเส้นใยและความยาวของเส้นใย และยังพบอีกด้วยว่า การทำแอลคาไลเซชันเส้นใยที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มค่าความต้านแรงดึง, ค่าความต้านการฉีกขาด และค่ามอดุลัสให้แก่พอลิเมอร์คอมโพสิตได้มากที่สุด

Choudhury [79] ศึกษาถึงการเกิดผลึกและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างป่านสรณารายณ์กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยเส้นใยป่านสรณารายณ์ในการศึกษานี้เป็นเส้นใยสั้น (~ 4 มิลลิเมตร) ซึ่งผ่านการทำแอลคาไลเซชัน และมีการใช้สารประสานประเภทไอ-

ออโนเมอร์ ผลที่ได้ คือ เส้นใยป่านศรนารายณ์สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสของผลึก (nucleating agent) ให้กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่า การใช้ไอออโนเมอร์เป็นสารประสานทำให้การถ่ายโอนแรงจากเมทริกซ์ไปสู่เส้นใยมีความสม่ำเสมอมากขึ้น



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้เริ่มด้วยการปรับปรุงอีพอกซีเรซินด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลตและไกลซิดิลเมทาคริเลต หลังจากนั้นใช้สูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติซึ่งมีความทนแรงกระแทกสูงที่สุดมาเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้เส้นใยปานครนารายณ์เป็นวัสดุเสริมแรง สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมด มีดังนี้

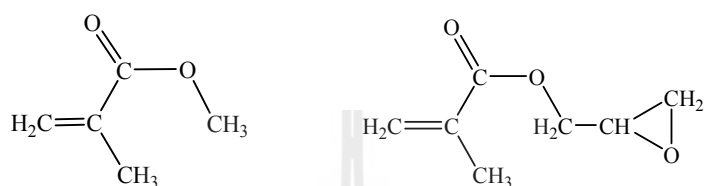
สารเคมีที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน เมทิลเอทิลคีโตน โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติที่มีแอมโมเนียสูงจากบริษัทไทยฮั้วรับเบอร์จำกัด (จ. อุตรธานี) รายการจำเพาะ (specification) ของน้ำยางธรรมชาติที่มีแอมโมเนียสูงแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการจำเพาะของน้ำยางธรรมชาติที่มีแอมโมเนียสูง

รายการจำเพาะ	ปริมาณ
1. ปริมาณของแข็งทั้งหมด, เปอร์เซ็นต์	61.23
2. ปริมาณยางแห้ง, เปอร์เซ็นต์	60.09
3. ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่ยางแข็ง, เปอร์เซ็นต์	1.14
4. ปริมาณแอมโมเนีย (น้ำหนักทั้งหมด), เปอร์เซ็นต์	0.60
5. ปริมาณแอมโมเนีย (ในน้ำ), เปอร์เซ็นต์	1.55
6. ค่าพีเอช	10.48
7. จำนวนโปแทสเซียม	0.52
8. จำนวนสารระเหยของกรดไขมัน	0.04
9. ความเสถียรเชิงกลของน้ำยาง, วินาที	330
10. แมกนีเซียมไอออน (ในของแข็ง), ส่วนในล้านส่วน	39.35

แคลเซียมคลอไรด์ ใช้สำหรับจับเนื้ออย่างธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลให้เป็นก้อน เฮกเซน สำหรับละลายอย่างธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล เมทิลแอลกอฮอล์ใช้ในการตกตะกอนอย่างธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

โพลูอินเป็นตัวทำละลายในการกราฟที่อย่างธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล เมทิลเมทาคริเลตและ ไกลซีดิลเมทาคริเลต คือ มอนอเมอร์สำหรับกระบวนการกราฟที่อย่างธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 3.1

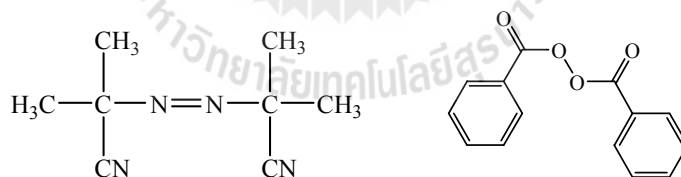


เมทิลเมทาคริเลต (MMA)

ไกลซีดิลเมทาคริเลต (GMA)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซีดิลเมทาคริเลต

โซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับล้างตัวยับยั้งปฏิกิริยาออกจากมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาในกระบวนการกราฟที่ คือ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์ โครงสร้างทางเคมีของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 3.2



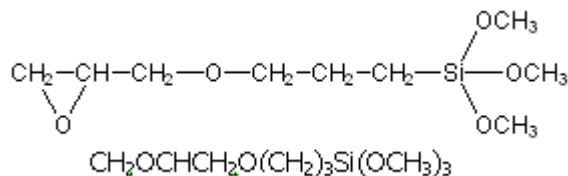
เอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์ (AIBN)

เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO)

รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

อะซีโตนใช้สำหรับตกตะกอนอย่างธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟที่ อีพอกซีเรซินชนิดบิสฟีนอลเอ (Epiclon 850) ซึ่งมีน้ำหนักอ็อกไซด์สมมูลเท่ากับ 184-194 กรัม/โมล และพอลิเอไมด์ (Luckamide GL 120) จากบริษัทสยามเคมีคอลจำกัด (Siam Chemical Industry Co., Ltd)

เส้นใยป่านครนารายณ์ได้รับจากกลุ่มแม่บ้านหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ต.บ้านเก่า อ.ด่านขุน-  
ทด จ. นครราชสีมา สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสาร  
ประสานไซเลน  $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilane (A-187) โครงสร้างทางเคมีของ A-187 แสดงไว้ใน  
รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของ  $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilane (A-187)

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การเตรียมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

เจือจางน้ำยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 61.23 เปอร์เซ็นต์ ด้วยน้ำ  
ปราศจากไอออนเพื่อให้ความเข้มข้นของเนื้อยางเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ในปริมาณ 1 ลิตร เติมนีล-  
เอทิลกลีโตนในปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2 เปอร์เซ็นต์โดย  
น้ำหนักของเนื้อยาง ตามลำดับ เมื่อผสมส่วนผสมทั้งหมดแล้ว ปรับความเป็นกรดเบสให้ได้ประมาณ 9-  
10 ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นคนด้วย  
เครื่องหมุนเชิงกลความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็น  
เวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้การปั๊มอากาศเข้าภายใน เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยา ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์  
ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสารทำให้ยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุลจับตัวกันเป็นก้อน ละลาย  
ก้อนสารที่ได้ในเฮกเซน และคนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อสารละลายตกตะกอนแล้ว  
กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ สารละลายที่กรองได้นำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการตกตะกอนซ้ำด้วย  
เมทานอล จากนั้นนำสารที่ได้อบให้แห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ยาง  
ธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล เรียกย่อ ๆ ว่า “DNR”

### 3.2.2 การเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับมอนอเมอร์ ผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลตและไกลซิديلเมทาคริเลต

ล้างตัวขั้วขั้วปฏิกิริยาออกจากเมทิลเมทาคริเลตโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร จำนวนสองครั้ง (อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร)  
ในกรวยแยก จากนั้นล้างมอนอเมอร์ด้วยน้ำปราศจากไอออนสามครั้งเพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่

ตกค้าง จากนั้นใส่แคลเซียมคลอไรด์ชนิดแห้งลงไปเพื่อลดความชื้นและนำไปเก็บในตู้เย็นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นกรองมอนอเมอร์ผ่านกระดาษกรองเพื่อแยกแคลเซียมคลอไรด์ออกและนำมอนอเมอร์ไปใช้ต่อไป ส่วนโกลซีคิลเมทาคริเลตใช้ในแบบที่นำมา

ละลายยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลในโทลูอีน (อัตราส่วน 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร) และคนด้วยเครื่องกวนความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เมื่อยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลละลายหมด เติมสารผสมของมอนอเมอร์แล้วคนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา แล้วดำเนินปฏิกิริยาต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดกตะกอนของกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยอะซิโตนที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นล้างด้วยอะซิโตน แล้วนำกราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้ไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณของสารที่มีการปรับเปลี่ยนในขั้นตอนการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ โดยทุก ๆ การทดลองคงปริมาณยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุลให้เท่ากับ 5 กรัม และโทลูอีนปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ในขั้นการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์นี้ ศึกษาผลของชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาซึ่งเปรียบเทียบระหว่างเอโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์กับเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณของมอนอเมอร์ผสมเท่ากับ 50 ส่วนในร้อยส่วน นอกจากนี้ ยังศึกษาความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มีต่อองค์การกราฟท์ของเมทิลเมทาคริเลตและโกลซีคิลเมทาคริเลตบนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 1, 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วน และปริมาณของมอนอเมอร์ผสม คือ 20, 30, 50 และ 75 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

การตั้งชื่อกราฟท์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งกราฟท์ด้วยมอนอเมอร์ผสมระหว่างเมทิลเมทาคริเลตและโกลซีคิลเมทาคริเลตในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายโดย พิจารณาจากตัวอย่างของ 20\_1AIBN ซึ่งเลข “20” แทนปริมาณของมอนอเมอร์ผสมที่ใช้ในการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ “1” แทนปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ และ “AIBN” แทนชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังนั้น 20\_1AIBN หมายความว่า ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ถูกเตรียมโดยใช้ปริมาณมอนอเมอร์ผสมเท่ากับ 20 ส่วนในร้อยส่วน ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน และใช้เอโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่ได้้องการกราฟท์ที่เหมาะสม จะถูกเพิ่มปริมาณการเตรียมมากขึ้นเพื่อใช้สำหรับการผสมกับอีพอกซีเรซิน ปริมาณที่มากขึ้นในแต่ละสภาวะการทดลองจะใช้ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลปริมาณ 15 กรัมและโทลูอีน 150 มิลลิลิตร โดยปริมาณของสารแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ปริมาณของสารที่ปรับเปลี่ยนในการเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับ เมทิลเมทาคริเลตและ โกลซิดิลเมทาคริเลต

กราฟท์โคพอลิเมอร์	เมทิลเมทาคริเลต (กรัม)	โกลซิดิลเมทาคริเลต (กรัม)	เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (กรัม)	เบนโซอิล-เปอร์ออกไซด์ (กรัม)
20_1AIBN	0.90	0.10	0.05	-
20_2AIBN	0.90	0.10	0.10	-
20_3AIBN	0.90	0.10	0.15	-
30_1AIBN	1.35	0.15	0.05	-
30_2AIBN	1.35	0.15	0.10	-
30_3AIBN	1.35	0.15	0.15	-
50_1AIBN	2.25	0.25	0.05	-
50_2AIBN	2.25	0.25	0.10	-
50_3AIBN	2.25	0.25	0.15	-
75_1AIBN	3.38	0.38	0.05	-
75_2AIBN	3.38	0.38	0.10	-
75_3AIBN	3.38	0.38	0.15	-
50_1BPO	2.25	0.25	-	0.07
50_2BPO	2.25	0.25	-	0.13
50_3BPO	2.25	0.25	-	0.20

ตารางที่ 3.3 ปริมาณของสารต่าง ๆ ที่ใช้ในกรณีเตรียมกราฟท์โคพอลิเมอร์ในปริมาณที่มากขึ้น

กราฟท์โคพอลิเมอร์	เมทิลเมทาคริเลต (กรัม)	โกลซิดิลเมทาคริเลต (กรัม)	เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (กรัม)
20_2AIBN(L)	2.70	0.30	0.30
30_2AIBN(L)	4.05	0.45	0.30
50_2AIBN(L)	6.75	0.75	0.30



### 3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับอีพอกซีเรซิน

ละลายยาง (ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์) ในอีพอกซีเรซิน ด้วยการคนด้วยเครื่องกวนเชิงกลความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นลดอุณหภูมิของสารผสมลงเป็น 60 องศาเซลเซียส แล้วเติมพอลิเอไมด์ ปริมาณ 40 ส่วนในร้อยส่วนของอีพอกซี กวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เวลา 3 นาที เมื่อผสมเสร็จ เทลงบนแม่พิมพ์ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ความหนา 4 มิลลิเมตร ซึ่งวางไว้ภายในโถดูดความชื้น จากนั้นดูดอากาศออกเป็นเวลา 15 นาที แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ คัดชิ้นงานขนาดต่าง ๆ ตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละชนิดโดยใช้เครื่องเลื่อยชนิดสายพาน ทำการขัดขอบของชิ้นงานด้วยเครื่องกระดาษทรายเพื่อให้ผิวเรียบ นำชิ้นงานที่ได้อบบ่ม (post cure) ในตู้อบอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดให้ปล่อยให้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบ องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ชื่อและองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับอีพอกซีเรซิน

ชนิดของพอลิเมอร์	อีพอกซีเรซิน (กรัม)	ตัวทำแข็ง (กรัม)	ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (กรัม)	ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ (กรัม)
Neat epoxy	100	40	-	-
0.5_DNR	100	40	0.5	-
1_DNR	100	40	1.0	-
2_DNR	100	40	2.0	-
3_DNR	100	40	3.0	-
1_20_2AIBN(L)	100	40	-	1.0
1_30_2AIBN(L)	100	40	-	1.0
1_50_2AIBN(L)	100	40	-	1.0

### 3.2.4 การเตรียมเส้นใยป่านศรนารายณ์

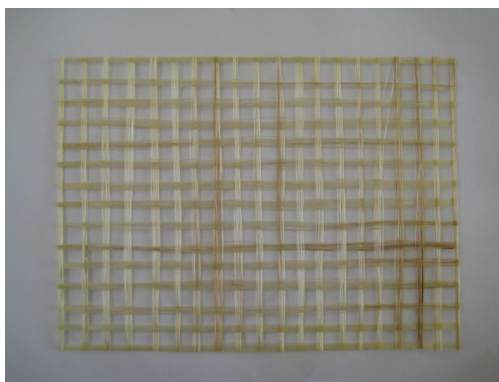
นำเส้นใยป่านที่อยู่ในรูปเส้นใยยาวประมาณ 2 เมตร โดยตัดเอาเฉพาะส่วน โคนประมาณ 2 ใน 3 ของความยาวทั้งหมด ก่อนทำการปรับสภาพพื้นผิว

#### 3.2.4.1 การทำแอลคาลิเซชัน (Alkalization)

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเส้นใยคือ 10 ต่อ 1 (liquor ratio 10:1) กวนเส้นใยป่านในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาล้างด้วยน้ำให้ได้ค่า pH ประมาณ 7 แล้วนำไปอบที่ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยป่านมัดรวมเป็นกลุ่ม ๆ ละประมาณ 8-12 เส้น แล้วนำไปสานเป็นผืน ลักษณะแบบตาข่ายขนาด 1x1 เซนติเมตร

#### 3.2.4.2 การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารประสานไซเลน (Silane Coupling Agents)

เตรียมสารละลายของสารประสานไซเลน  $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilane (A-187) ในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และปรับ pH ของสารละลายด้วยกรดอะซิติกให้ได้ pH 3.5 แล้วนำเส้นใยป่านมาแช่ในสารละลายไซเลน โดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายไซเลนกับเส้นใยคือ 10:1 (liquor ratio 10:1) ขณะที่แช่จะทำการกวนด้วยตลอดเวลา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาล้างด้วยน้ำให้ได้ค่า pH ประมาณ 7 แล้วนำไปอบที่ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยป่านมัดรวมเป็นกลุ่ม ๆ ละประมาณ 8-12 เส้น แล้วนำไปสานเป็นผืน ลักษณะแบบตาข่ายขนาด 1x1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เส้นใยป่านศรนารายณ์สานแบบตาข่ายขนาด 1x1 เซนติเมตร

### 3.2.5 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

นำอีพอกซีเรซินปริมาณ 150 กรัม ไปอบในตู้อบสูญญากาศที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเตรียมพอลิเอไมด์ปริมาณ 40 ส่วนในร้อยส่วนของอีพอกซี อบเส้นใยปานสรณารายณ์ที่สานเตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต ขั้นตอนการผสมเริ่มจากนำยางธรรมชาติชนิดที่สามารถเพิ่มค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซินดีที่สุด ปริมาณ 1 ส่วนในร้อยส่วน มาละลายในอีพอกซีเรซินที่เตรียมไว้ด้วยการคนด้วยเครื่องกวนความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้อบที่ 60 องศาเซลเซียส แล้วเตรียมอีพอกซีแบบเดียวกันอีกหนึ่งชุด หลังจากนั้นนำอีพอกซีที่เตรียมไว้ชุดแรกมาเติมพอลิเอไมด์ กวนจนเข้ากัน เมื่อผสมเสร็จเทลงบนแม่พิมพ์ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร จากนั้นค่อยๆ วางเส้นใยสานลงทีละชั้นจนครบตามน้ำหนักที่ต้องการแล้วใช้แท่งเหล็กกรีตอีพอกซีออก จากนั้นผสมอีพอกซีกับพอลิเอไมด์อีกชุดหนึ่งมาเททับลงไปบนเส้นใยจนเต็มแม่พิมพ์ แล้วใช้ไมลาร์ฟิล์มปิดทับลงไปบนผิวหน้าเพื่อไล่ฟองอากาศออก แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะที่ได้แสดงดังรูปที่

3.5



รูปที่ 3.5 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสรณารายณ์และอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ

แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ตัดชิ้นงานขนาดต่าง ๆ ตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละชนิด โดยใช้เครื่องเลื่อยชนิดสายพาน ทำการขัดขอบของชิ้นงานด้วยเครื่องกระดาษทรายเพื่อให้ผิวเรียบ นำชิ้นงานที่ได้อบบ่ม (post cure) โดยการอบในตู้อบ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ชิ้นงานที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วย  
ยางธรรมชาติ

เมื่อครบกำหนดการอบบ่มปล่อยให้วัสดุที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบ  
องค์ประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิต แสดงดังตารางที่ 3.5 และจำนวนแผ่นของเส้นใยสานในพอลิ  
เมอร์คอมโพสิตแสดงไว้ในตารางที่ 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 ชื่อและองค์ประกอบของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิต

ชนิดของพอลิเมอร์	อีพอกซี เรซิน (กรัม)	ตัวทำ แข็ง (กรัม)	เส้นใยป่าน ศรนารายณ์ (เปอร์เซ็นต์)	ยาง (กรัม)
Epoxy <sup>a</sup>	150	60	-	-
Epoxy blend <sup>b</sup>	150	60		1.5
Composite_3% A-sisal	150	60	3 ± 0.5 <sup>c</sup>	1.5
Composite_5% A-sisal	150	60	5 ± 0.5 <sup>c</sup>	1.5
Composite_7% A-sisal	150	60	7 ± 0.5 <sup>c</sup>	1.5
Composite__3% silane-A-sisal	150	60	3 ± 0.5 <sup>d</sup>	1.5
Composite__5% silane-A-sisal	150	60	5 ± 0.5 <sup>d</sup>	1.5
Composite__7% silane-A-sisal	150	60	7 ± 0.5 <sup>d</sup>	1.5

<sup>a</sup>อีพอกซีที่เตรียมด้วยสถานะเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

<sup>b</sup>อีพอกซีเรซินผสมกับยางธรรมชาติคัดแปรที่เพิ่มความทนแรงกระแทกแก่อีพอกซีสูงที่สุดเตรียมด้วย  
สถานะเดียวกับพอลิเมอร์คอมโพสิต

<sup>c</sup>เส้นใยป่านศรนารายณ์ผ่านการทำแอลคาไลเซชัน

<sup>d</sup>เส้นใยป่านศรนารายณ์ผ่านการทำแอลคาไลเซชันและปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน

ตารางที่ 3.6 จำนวนแผ่นของเส้นใยป่านศรนารายณ์สานในพอลิเมอร์คอมโพสิตของอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติซึ่งลดน้ำหนักโมเลกุลที่ผ่านการกราฟท์ [ยาง 30\_2AIBN(L)]

เปอร์เซ็นต์เส้นใยในพอลิเมอร์คอมโพสิต (%)	จำนวนแผ่นของเส้นใย* (แผ่น)
3%	3
5%	5
7%	7

\*น้ำหนักต่อแผ่น  $1.86 \pm 0.07$  g, ความหนาแน่นเส้นใย  $1.1951$  g/cm<sup>3</sup>

### 3.2.6 การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและผ่านการกราฟท์

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี 300 เมกกะเฮิร์ต (Varian, Inova 300) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มดีอะตอม ความเข้มข้นในการวิเคราะห์ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไตรเมทิลไซเลน (TMS) เป็นตัวอ้างอิงภายในและรายงานการเลื่อนทางเคมี (chemical shift) ในหน่วย ppm

น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องเจลเพอร์มิเอเบิลโครมาโตกราฟี คอลัมน์ขนาด 300x7.5 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยโคพอลิเมอร์ของสไตรีนไดไวนิลเบนซีน ขนาด 5 ไมโครเมตร ใช้ตัวจับสัญญาณชนิดความแตกต่างของดัชนีหักเห (RI-G1362A) อุณหภูมิของคอลัมน์และตัวจับสัญญาณเท่ากับ 40 และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์เทียบจากกราฟของพอลิสไตรีนมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวชะ อัตราเร็วการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งก่อนการวิเคราะห์กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองชนิดพอลิเอไมด์

### 3.2.7 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

การตรวจสอบค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และอีพอกซีคอมโพสิต ทำตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยใช้เครื่อง Basic Pendulum Impact (BPI) บริษัท Atlas polymer evaluation products, load 2.7 J ที่อุณหภูมิห้อง ขนาดของชิ้นงานยาว 64 มิลลิเมตร กว้าง 12.7

มิลลิเมตร หน้า 4 มิลลิเมตร หาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น ค่าพลังงานการกระแทก คำนวณและรายงานในหน่วย กิโลจูลต่อตารางเมตร

การทดสอบสมบัติการตัด โค้งของอีพอกซีบริสุทธ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิทของอีพอกซีทำตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยเตรียมชิ้นงานขนาดความยาว 87.4 มิลลิเมตร ความกว้าง 15 มิลลิเมตร หน้า 4 มิลลิเมตร ทดสอบ โดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569, เซลล์วัดแรง (load cell) ขนาด 50 กิโลนิวตัน (kN), ความเร็วในการกด 1.66 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างจุดรับแรงที่ปลายคานทั้งสอง (span length) เท่ากับ 62.4 มิลลิเมตร หาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น ระยะห่างระหว่างจุดรับแรงที่ปลายคานทั้งสองของเครื่องเท่ากับ 16 เท่าของความหนาของชิ้นงาน อัตราเร็วในการกดคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

เมื่อ  $R$  = อัตราเร็วในการกด, มิลลิเมตรต่อนาที  
 $L$  = ระยะห่างระหว่างจุดรับแรงที่ปลายคานทั้งสอง, มิลลิเมตร  
 $d$  = ความหนาของชิ้นงาน, มิลลิเมตร  
 $Z = 0.01$  มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตรต่อนาที

### 3.2.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาศึกษาจากพื้นผิวที่แตกหักของอีพอกซีบริสุทธ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิทของอีพอกซี ซึ่งหัก ณ อุณหภูมิห้อง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM 6400 ที่ 10 keV ใช้กำลังขยาย 500 เท่า เคลือบพื้นผิวชิ้นงานด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

จากที่กล่าวในบทที่ 1 จุดมุ่งหมายหนึ่งในการศึกษาครั้งนี้ คือ การเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซิน โดยการผสมกับยางธรรมชาติ ซึ่งโดยปกติยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นจึงยากที่จะทำให้กระจายตัวในอีพอกซีเรซิน และเพื่อทำให้การกระจายตัวของยางธรรมชาติในอีพอกซีเรซินเกิดขึ้น ยางธรรมชาติซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงจึงถูกลดน้ำหนักโมเลกุล ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลที่ได้เป็นของเหลวหนืดใสสีเหลืองเล็กน้อย มีลักษณะเหนียวและละลายได้ในคลอโรฟอร์ม น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและยางธรรมชาติถูกตรวจสอบโดยเครื่องเจลเพอร์มีเอเบิล โครมาโตกราฟี น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (DNR) แสดงในตารางที่ 4.1

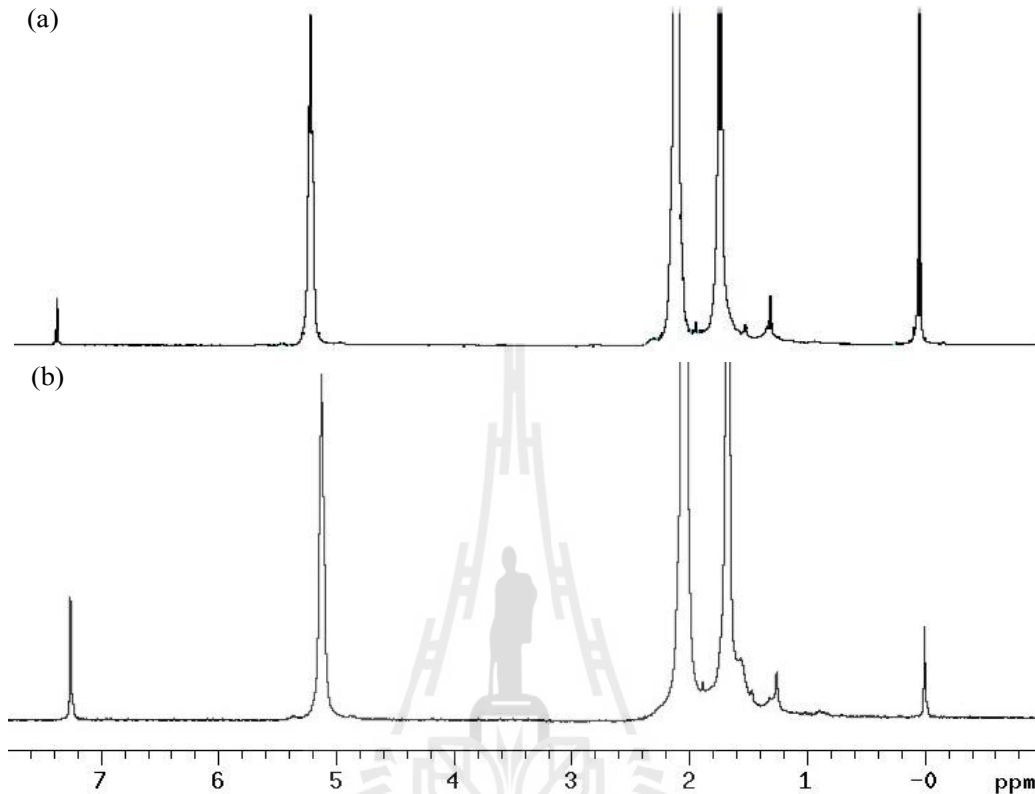
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

ชนิดของยาง	$M_n$ (g/mol)	$M_w$ (g/mol)	MWD
ยางธรรมชาติ	657,720	880,630	1.339
ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (DNR)	55,984	135,487	2.420

จากผลการทดสอบแสดงว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติลดลงอย่างมากหลังจากทำการลดน้ำหนักโมเลกุล การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างแคบ

การวิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลใช้เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเห็นได้ว่า ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกับยางธรรมชาติ โดยตำแหน่ง 5.12 ppm แสดงโปรตอนซึ่งติดอยู่กับคาร์บอนที่มีพันธะคู่ (unsaturated methyne proton, =CH) ตำแหน่ง 2.04 ppm แสดงเมทิลีนโปรตอน

(methylene protons,  $(\text{CH}_2)_2$ ) และ ตำแหน่ง 1.68 ppm แสดงสัญญาณเรโซแนนซ์ของ เมทิลโปรตอน (methyl proton,  $\text{CH}_3$ )



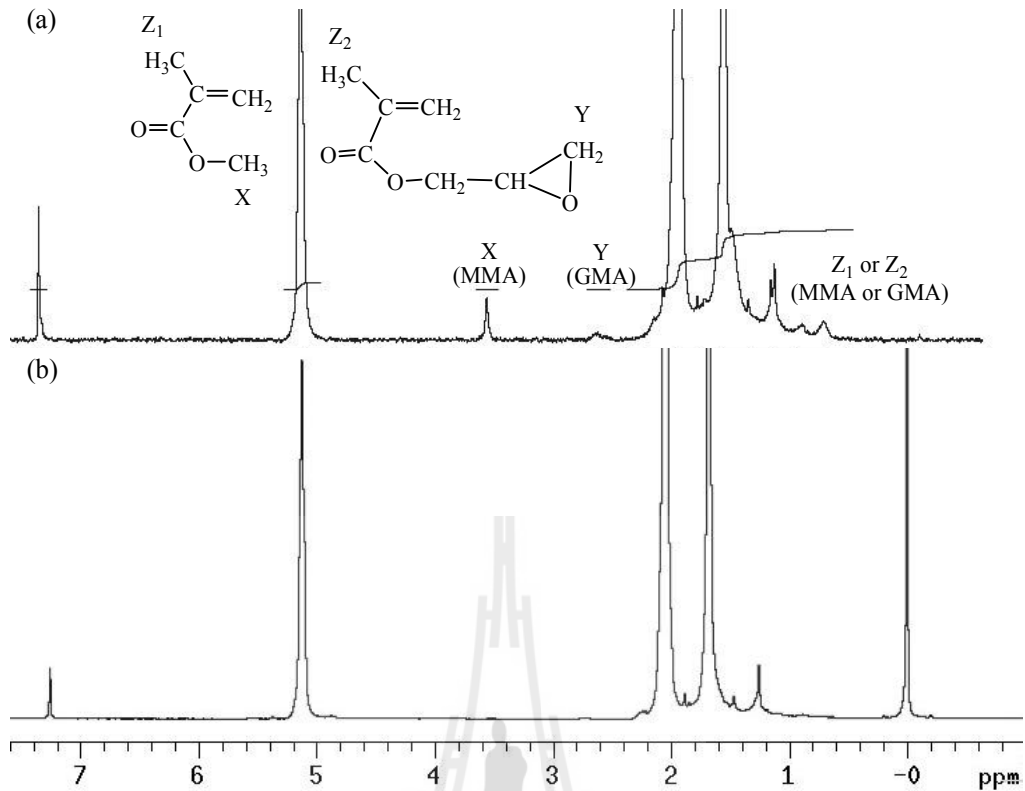
รูปที่ 4.1  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (a) และยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล (b)

#### 4.2 น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์

##### 4.2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์

ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้อัตราส่วนของมอนอเมอร์ผสมของเมทิลเมทาคริเลต (MMA) และ ไกลซีดีลเมทาคริเลต (GMA) เท่ากับ 90/10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปีเพื่อหาปริมาณของมอนอเมอร์ที่กราฟท์บนสายโซ่ รูปที่ 4.2 แสดง  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์และยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

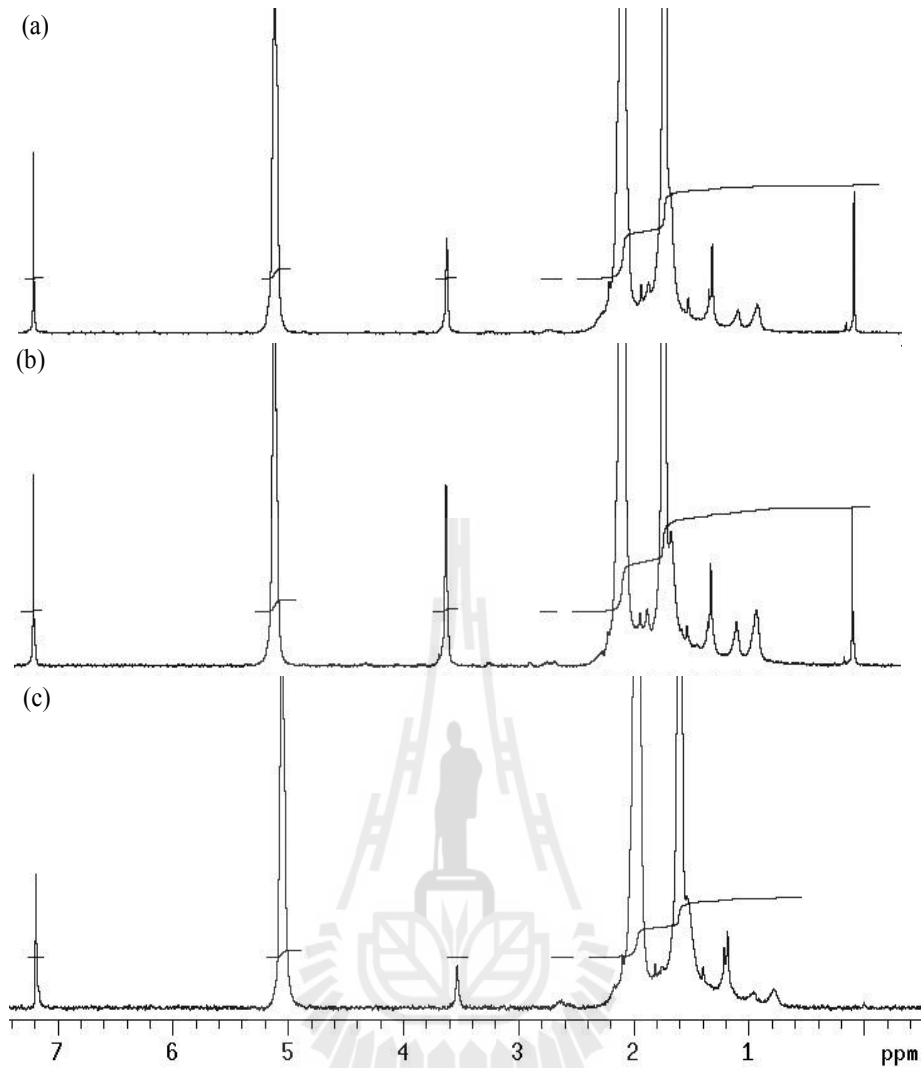




รูปที่ 4.2  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ (a) ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ และ (b) ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล

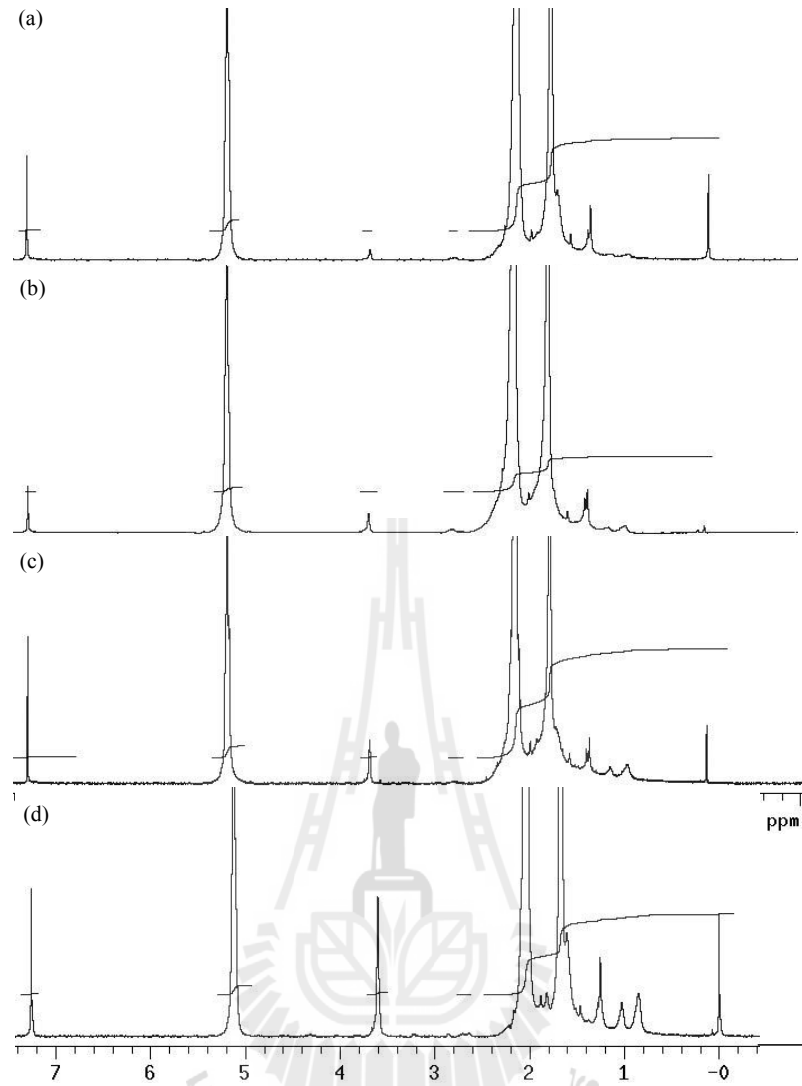
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมทอกซีโปรตอน (methoxy proton) ของหมู่อะคริลิกของเมทิลเมทาคริเลต (X) ปรากฏ ณ ตำแหน่ง 3.60 ppm ซึ่งแสดงว่า สายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลถูกกราฟท์ด้วยเมทิลเมทาคริเลต นอกจากนี้ ตำแหน่ง 2.65-2.85 ppm อาจเป็นสัญญาณของเมทิลลีนโปรตอนของหมู่เอพอกซีของไกลซิดิลเมทาคริเลต (Y) แต่อย่างไรก็ตาม สัญญาณต่ำมากเนื่องจากปริมาณของไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ใช้ในกระบวนการกราฟท์น้อย ตำแหน่ง 0.93-1.26 ppm อาจเป็นเมทิลโปรตอนของทั้งเมทิลเมทาคริเลต [80] และไกลซิดิลเมทาคริเลต [81] ดังนั้นตำแหน่งที่ชัดเจนซึ่งแสดงการปรากฏของไกลซิดิลเมทาคริเลตหรือเมทิลเมทาคริเลตบนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล คือ 2.65-2.85 และ 3.60 ppm ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ตำแหน่งดังกล่าวในการรายงานองศาการกราฟท์

เพื่อแสดงผลของความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อ โครงสร้างของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณของมอนอเมอร์ผสมเท่ากับ 75 ส่วนในร้อยส่วน และตัวริเริ่มปฏิกิริยาเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ความเข้มข้น แสดงในรูปที่ 4.3



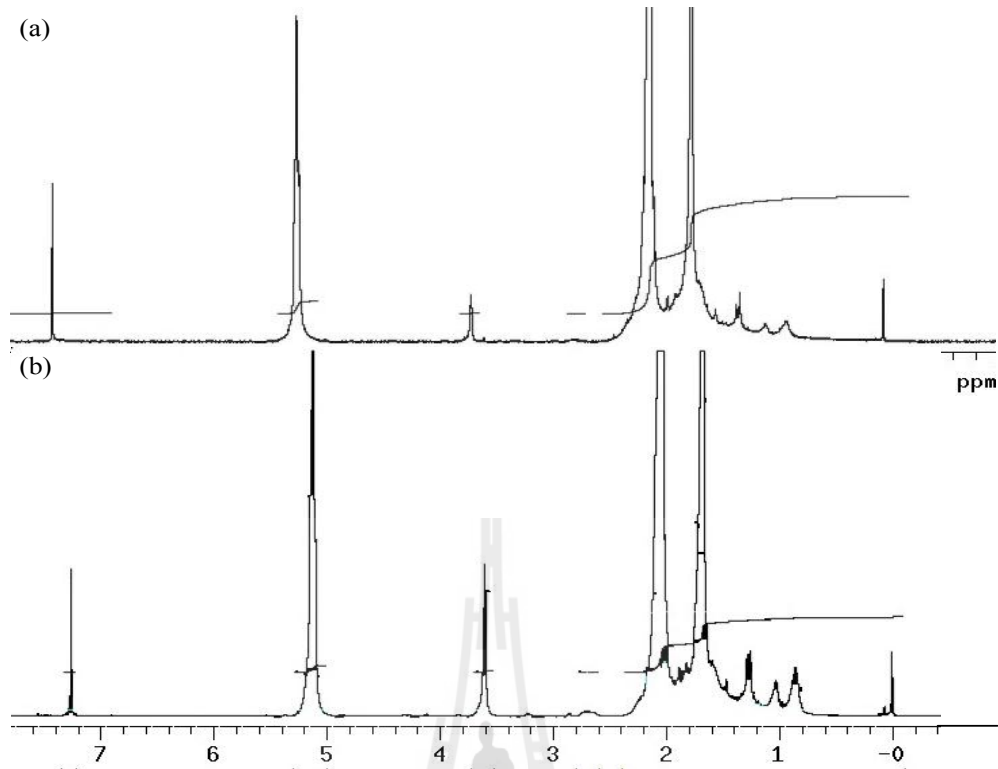
รูปที่ 4.3  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์; (a) 75\_1AIBN, (b) 75\_2AIBN และ (c) 75\_3AIBN

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เตรียมจากปริมาณความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 2 ส่วนในร้อยส่วน แสดงสัญญาณของมอนอเมอร์ที่กราฟท์บนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เตรียมจากปริมาณมอนอเมอร์ผสมที่ความเข้มข้นอื่นๆ (20, 30 และ 50 ส่วนในร้อยส่วน) แสดงแนวโน้มเดียวกัน สำหรับผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ผสมแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเห็นได้ว่า ที่ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากัน สัญญาณของมอนอเมอร์ที่กราฟท์บนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของมอนอเมอร์ผสม



รูปที่ 4.4  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักรวมโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์; (a) 20\_2AIBN, (b) 30\_2AIBN, (c) 50\_2AIBN และ (d) 75\_2AIBN

รูปที่ 4.5 แสดง  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักรวมโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์โดยใช้เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ จากรูปจะพบว่า เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มที่ให้สัญญาณของมอนอเมอร์ที่กราฟท์บนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักรวมโมเลกุลสูงกว่าการใช้เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา



รูปที่ 4.5  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์; (a) 50\_2AIBN และ (b) 50\_2BPO

#### 4.2.2 องค์การกราฟท์

องค์การกราฟท์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ด้วยสภาวะการกราฟท์ที่แตกต่างกันนั้น ประเมินตามองค์ประกอบของโคพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี [82]

จากความแตกต่างของสัญญาณในรูปที่ 4.6 ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตต่อโปรตอน (*MMA*) ปริมาณของไอโซพรีนต่อโปรตอน (*NR*) และปริมาณของไกลซีดิลเมทาคริเลตต่อโปรตอน (*GMA*) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$MMA = \frac{A_{\delta 3.60}}{3} \quad (1)$$

$$GMA = \frac{A_{\delta 2.65-2.85}}{2} \quad (2)$$

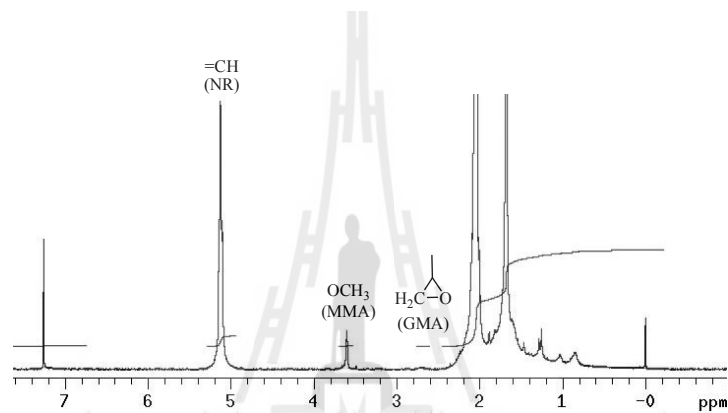
$$NR = \frac{A_{\delta 5.12}}{1} \quad (3)$$

เมื่อ  $A_{\delta_{3.60}}$ ,  $A_{\delta_{2.65-2.85}}$  และ  $A_{\delta_{5.12}}$  คือ พื้นที่ใต้พีคของเมทิลเมทาคริเลต ไกลซีดิลเมทาคริเลต และไอโซพรีนตามลำดับ

สัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลต ( $F_{MMA-g}$ ) และไกลซีดิลเมทาคริเลต ( $F_{GMA-g}$ ) ในกราฟที่โคพอลิเมอร์คำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$F_{MMA-g} = \frac{MMA}{(MMA + GMA)} \quad (4)$$

$$F_{GMA-g} = \frac{GMA}{(MMA + GMA)} \quad (5)$$



รูปที่ 4.6  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ 50\_2AIBN

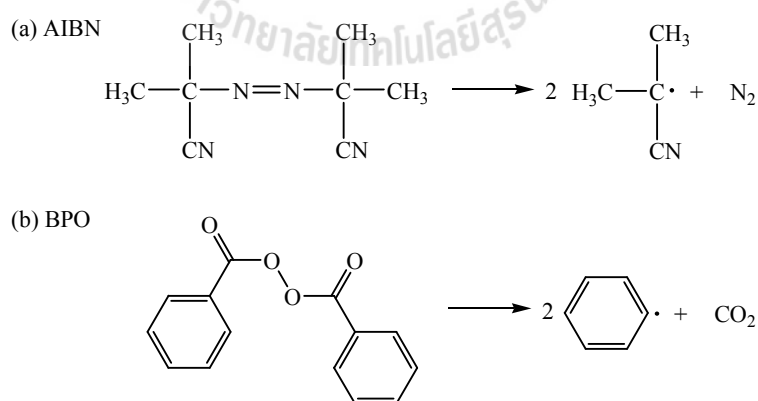
#### 4.2.2.1 ผลของชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบกราฟที่

เพื่อศึกษาผลของชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบกราฟที่ ในกระบวนการกราฟที่คงปริมาณมอนอเมอร์ผสมเท่ากับ 50 ส่วนในร้อยส่วนของปริมาณยาง ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษา คือ เอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตต่อโปรตอน ( $MMA$ ) ปริมาณของไอโซพรีนต่อโปรตอน ( $NR$ ) ปริมาณของไกลซีดิลเมทาคริเลตต่อโปรตอน ( $GMA$ ) สัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลต ( $F_{MMA-g}$ ) และไกลซีดิลเมทาคริเลต ( $F_{GMA-g}$ ) ในกราฟที่โคพอลิเมอร์ซึ่งคำนวณจากความแตกต่างของสัญญาณแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของกราฟที่โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟที่ โดยเตรียมจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

กราฟที่โคพอลิเมอร์	<i>NR</i>	<i>MMA</i>	<i>GMA</i>	$F_{MMA-g}$	$F_{GMA-g}$
50_1BPO	10.310	0.433	0.095	0.820	0.180
50_2BPO	9.820	0.743	0.135	0.847	0.153
50_3BPO	9.530	0.783	0.115	0.872	0.128
50_1AIBN	10.830	0.157	0.060	0.724	0.276
50_2AIBN	9.630	0.283	0.050	0.850	0.150
50_3AIBN	10.330	0.133	0.085	0.611	0.389

ผลในตารางที่ 4.2 ซึ่งให้เห็นว่า ปริมาณเมทิลเมทาคริเลตในกราฟที่โคพอลิเมอร์ สูงกว่าระดับของไกลซีดิลเมทาคริเลต ทั้งนี้ น่าจะมีผลมาจากปริมาณของไกลซีดิลเมทาคริเลตที่ใช้ใน กระบวนการกราฟที่มีปริมาณต่ำกว่ามาก และที่ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากัน เบนโซอิลเปอร์ ออกไซด์ให้องศาการกราฟที่สูงกว่าเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์ อาจเป็นเพราะเวลาครึ่งชีวิตของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ยาวกว่าเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์ ปริมาณของมอนอเมอร์ที่ถูกกราฟที่ลงบนสายโซ่จะเพิ่มขึ้นตามเวลาครึ่งชีวิตของตัวริเริ่มปฏิกิริยา [83] และอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาของเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์มีความกะกะมากกว่าเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ แผนภาพการแตกตัวของเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพการแตกตัวของ (a) เอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรล์ และ (b) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ายางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เตรียมจากเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ในห้องปฏิบัติการที่สูงกว่าเตรียมจากเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัล แต่ไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในอีพอกซีเรซิน อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาของหมู่วงไวด์ต่อปฏิกิริยาบนโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลทำให้เกิดเจล (gel fraction) ในโคพอลิเมอร์ [31] ดังนั้นจึงเลือกเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัลเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการกราฟท์ เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกราฟท์

#### 4.2.2.2 ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อองค์การกราฟท์

ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อองค์การกราฟท์ศึกษาโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของมอนอเมอร์ผสมเป็น 20, 30, 50 และ 75 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ใช้เอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัลเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 1, 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วน ปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตต่อโปรตอน (MMA) ปริมาณของไอโซพรีนต่อโปรตอน (NR) ปริมาณของไกลซีดิลเมทาคริเลตต่อโปรตอน (GMA) สัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลต ( $F_{MMA-g}$ ) และไกลซีดิลเมทาคริเลต ( $F_{GMA-g}$ ) ในกราฟท์โคพอลิเมอร์ แสดงในตารางที่ 4.3

จากผลการวิจัยพบว่า ทุก ๆ ปฏิกิริยาแสดงปริมาณรวมของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซีดิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 2 ส่วนในร้อยส่วน แต่เมื่อปริมาณของความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 3 ส่วนในร้อยส่วน ปริมาณรวมของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซีดิลเมทาคริเลตลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณของเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัลที่มากเกินไปทำให้เกิดสายโซ่ของไฮโดรพอลิเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสิ้นสุดของสายโซ่แผ่ขยาย สัดส่วนของเมทิลเมทาคริเลต ( $F_{MMA-g}$ ) ในกราฟท์โคพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่สัดส่วนของไกลซีดิลเมทาคริเลตมีแนวโน้มลดลง

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ พบว่า ปริมาณรวมของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซีดิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์ โดยทั่วไป ปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น [84] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณของเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัลเท่ากับ 2 ส่วนในร้อยส่วนของสารกราฟท์เรียงตามลำดับ ดังนี้  $75_{2AIBN} > 50_{2AIBN} > 30_{2AIBN} > 20_{2AIBN}$  แม้ว่ายางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เตรียมจากปริมาณมอนอเมอร์ผสมเท่ากับ 75 ส่วนในร้อยส่วน ในห้องปฏิบัติการที่สูงที่สุด แต่ขั้นตอนการตกตะกอนออกจากสารละลายทำได้ยาก เนื่องจากมีปริมาณของไฮโดรพอลิเมอร์เกิดขึ้นจำนวนมาก

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของกราฟที่โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟที่โดยเตรียมจากเอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

กราฟที่โคพอลิเมอร์	มอนอเมอร์ผสม (phr)	AIBN (%)	NR	MMA	GMA	$F_{MMA-g}$	$F_{GMA-g}$
20_1AIBN	20	1	10.470	0.053	0.050	0.516	0.484
20_2AIBN		2	10.390	0.067	0.040	0.625	0.375
20_3AIBN		3	10.490	0.037	0.050	0.423	0.577
30_1AIBN	30	1	10.470	0.083	0.080	0.510	0.490
30_2AIBN		2	10.240	0.150	0.095	0.612	0.388
30_3AIBN		3	9.450	0.093	0.085	0.523	0.477
50_1AIBN	50	1	10.830	0.157	0.060	0.723	0.277
50_2AIBN		2	9.630	0.283	0.050	0.850	0.150
50_3AIBN		3	10.330	0.133	0.085	0.611	0.389
75_1AIBN	75	1	9.950	0.423	0.070	0.858	0.142
75_2AIBN		2	9.400	0.893	0.085	0.913	0.087
75_3AIBN		3	9.830	0.303	0.115	0.725	0.275

#### 4.2.3 ลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟที่สำหรับผสมกับอีพอกซีเรซิน

จากที่กล่าวไปในหัวข้อ 4.2.2.2 ประสิทธิภาพการกราฟที่สูงสุดของมอนอเมอร์ผสมบนยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล พบเมื่อ ใช้ปริมาณของเอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์เท่ากับ 2 ส่วนในร้อยส่วน ดังนั้น ในการเตรียมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟที่สำหรับผสมกับอีพอกซีเรซิน เตรียมโดย คงปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 2 ส่วนในร้อยส่วน และปรับเปลี่ยนปริมาณของมอนอเมอร์ผสมในช่วง 20 ถึง 50 ส่วนในร้อยส่วน เพื่อให้ได้ปริมาณองศาการกราฟที่ที่แตกต่างกัน



#### 4.2.3.1 น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์

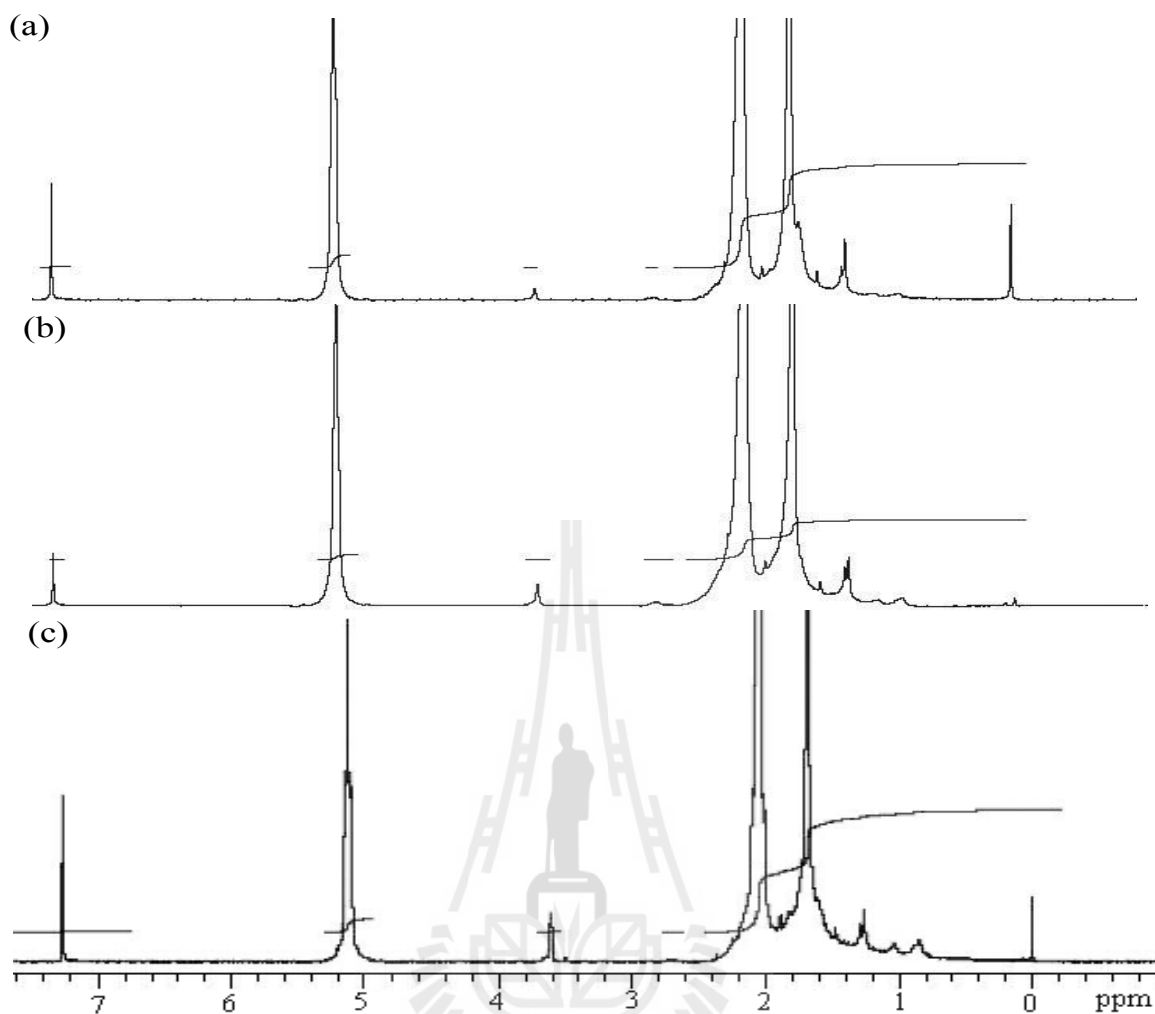
การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์ก่อนการผสมกับอีพอกซีเรซินทำโดยใช้เครื่องเจลเพอร์มีเอเบิลโครมาโตกราฟี น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลแสดงในตารางที่ 4.4

จากผลในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์มีค่าต่ำกว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า เกิดการตัดสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลในกระบวนการกราฟท์ การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลอาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการกราฟท์มีอุณหภูมิสูง [80] และการเสื่อมสภาพของโมเลกุลของยางธรรมชาติอาจเกิดขึ้นได้บ้างเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นเอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ [85] นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของมอนอเมอร์ผสม เนื่องจากความว่องไวของอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์สูงขึ้นทำให้เพิ่มการตัดสายโซ่ การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์มีความแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม 30\_2AIBN(L) แสดงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์

ชนิดของยาง	$M_n$ (g/mol)	$M_w$ (g/mol)	MWD
DNR	55,984	135,487	2.420
20_2AIBN(L)	46,715	105,691	2.262
30_2AIBN(L)	25,991	70,574	2.715
50_2AIBN(L)	24,684	57,260	2.320

รูปที่ 4.8 แสดง  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์สำหรับผสมกับอีพอกซีเรซิน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ระดับของมอนอเมอร์ที่กราฟท์บนยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ใช้



รูปที่ 4.8  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์;  
(a) 20\_2AIBN(L), (b) 30\_2AIBN(L) และ (c) 50\_2AIBN(L)

#### 4.2.3.2 องศาการกราฟท์

ตารางที่ 4.5 แสดงส่วนประกอบกราฟท์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์สำหรับใช้ในพอลิเมอร์ผสม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า องศาการกราฟท์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนี้  $50\_2\text{AIBN(L)} > 30\_2\text{AIBN(L)} > 20\_2\text{AIBN(L)}$  ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่อธิบายในหัวข้อ 4.2.2.2

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของกราฟที่โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟที่สำหรับผสมกับอีพอกซีเรซิน

กราฟที่โคพอลิเมอร์	<i>NR</i>	<i>MMA</i>	<i>GMA</i>	$F_{MMA-g}$	$F_{GMA-g}$
20_2AIBN(L)	10.290	0.052	0.038	0.579	0.421
30_2AIBN(L)	10.050	0.117	0.073	0.617	0.383
50_2AIBN(L)	10.230	0.220	0.055	0.800	0.200

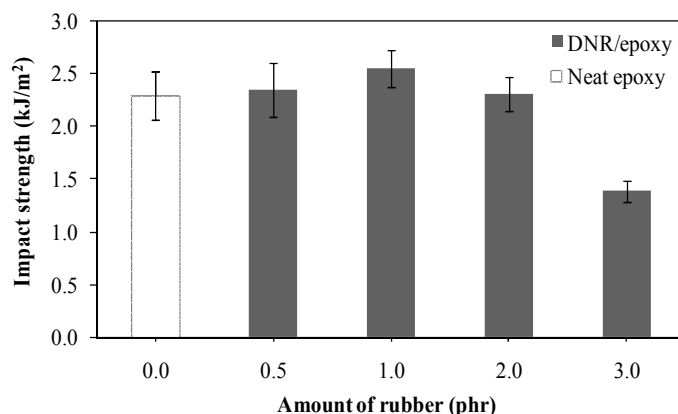
#### 4.3 สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

##### 4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซินเตรียมขึ้นโดยผสมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (DNR) ปริมาณ 0.5, 1, 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วน กับอีพอกซีเรซิน และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยตัวทำแข็งชนิดพอลิเอไมด์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

##### 4.3.1.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

ผลการทดสอบค่าความทนแรงกระแทกรายงานเป็นพลังงานการดูดกลืนต่อหน่วยของพื้นที่หน้าตัดหลังรอยบาก รูปที่ 4.9 แสดง ค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน



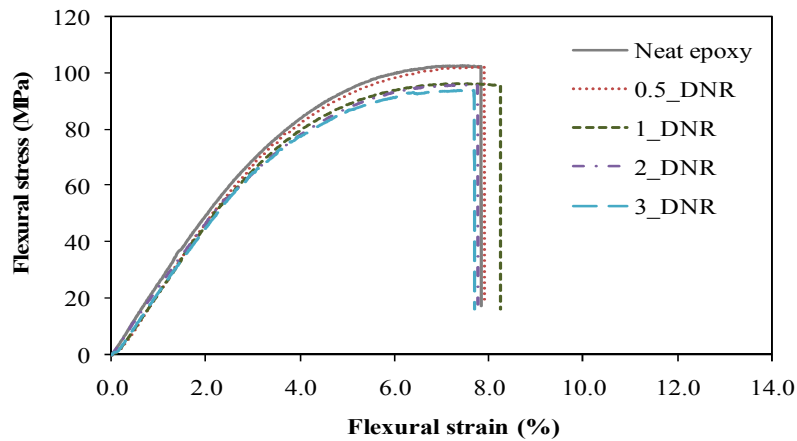
**รูปที่ 4.9** ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

ผลการวิจัยแสดงว่า ค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซิน โดยทั่วไปเพิ่มขึ้นเมื่อผสมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ยกเว้นกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 3 ส่วนในร้อยส่วน สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ส่วนในร้อยส่วน ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าของอีพอกซีบริสุทธิ์ อาจเป็นเพราะยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลแสดงสมบัติของอนุภาคยางในเมทริกซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดรวมความเค้น (stress concentrator) และทำให้เกิดการยึดแบบเฉือน (shear yielding) และ/หรือ การร้าว (crazing) ในเมทริกซ์

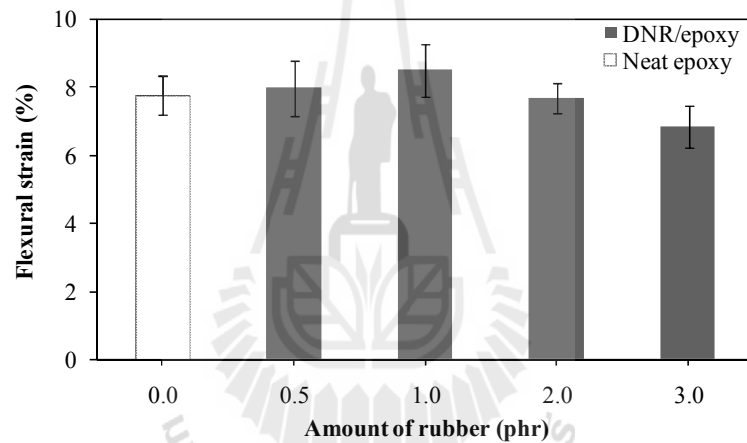
นอกจากนี้โมเลกุลของยางที่ละลายในเมทริกซ์อีพอกซีอาจนำไปสู่ความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน แสดงค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุดในกรณีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน อาจเนื่องมาจากทั้งผลของการเพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่น ทำให้ได้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นสูงที่สุด [27] อย่างไรก็ตาม ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 3 ส่วนในร้อยส่วน มีค่าต่ำกว่าของอีพอกซีบริสุทธิ์ อาจเนื่องมาจากการรวมตัวของอนุภาคยาง ซึ่งขนาดอนุภาคยางที่ใหญ่อาจทำให้การยึดติดระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์น้อยลง สามารถพิจารณาได้จากพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (ในหัวข้อ 4.3.2)

#### 4.3.1.2 สมบัติการตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

ค่าความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด (flexural strain at break, %) ของอีพอกซี-เพิ่มขึ้นเมื่อผสมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (DNR) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11

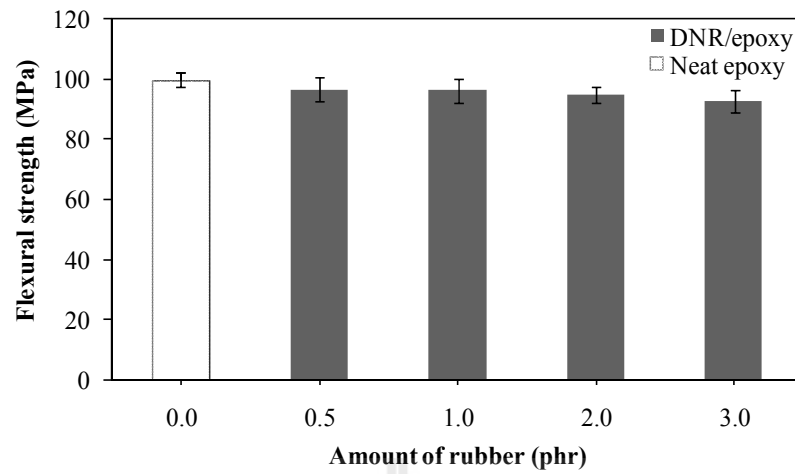


**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดคดโค้งของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

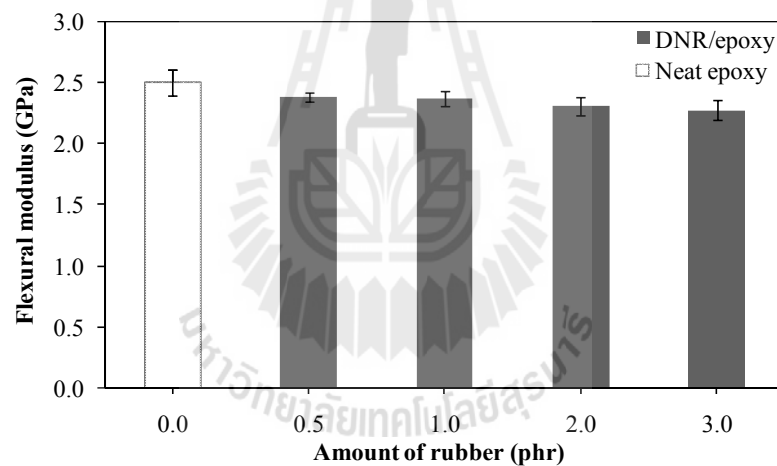


**รูปที่ 4.11** ความเครียดคดโค้ง ณ จุดขาด (flexural strain at break, %) ของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

ค่าความเครียดคดโค้งของพอลิเมอร์ผสมสอดคล้องกับค่าความทนแรงกระแทกพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยละ แสดงค่าความเครียดคดโค้งสูงสุด อีพอกซีที่ถูกปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดสูงขึ้นก่อนการเสียหาย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่แสดงการเพิ่มสมบัติของความเหนียวของอีพอกซีเรซิน [27] และเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ [16, 21, 26] การเติมยางเข้าไปในอีพอกซีเรซินส่งผลให้ค่ามอดูลัสคดโค้งและค่าความต้านแรงคดโค้งลดลงเล็กน้อย การลดลงของค่าความต้านแรงคดโค้งและค่ามอดูลัสคดโค้งแสดงในรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปรกติเพราะโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเป็นส่วนที่นุ่มซึ่งมีค่ามอดูลัสต่ำ [26-27]



รูปที่ 4.12 ความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 4.13 โมดูลัสดัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

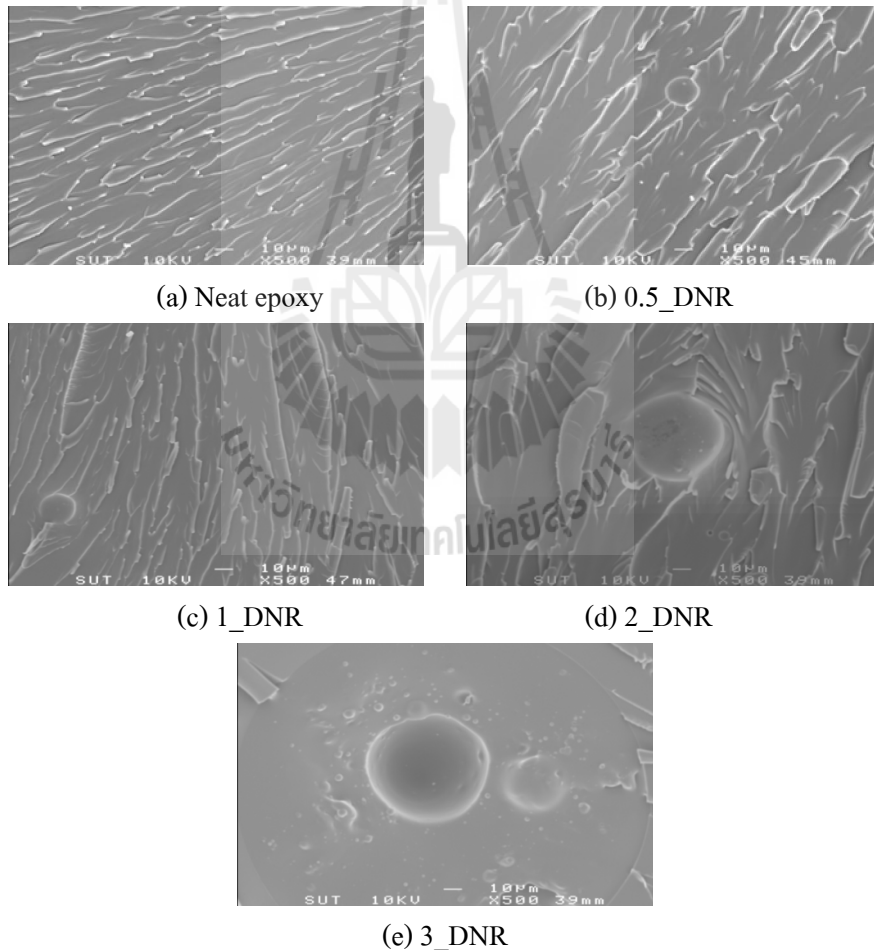
ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

ชนิดของพอลิเมอร์	ปริมาณของยาง (phr)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	มอดูลัสตัดโค้ง (GPa)	ความต้านแรงตัดโค้ง (MPa)	ความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด (%)
Neat epoxy	0	2.292±0.224	2.504±0.106	99.488±2.440	7.771±0.582
0.5_DNR	0.5	2.344±0.259	2.376±0.037	96.299±4.012	7.957±0.818
1_DNR	1.0	2.544±0.179	2.368±0.065	96.008±4.125	8.482±0.768
2_DNR	2.0	2.303±0.159	2.309±0.077	94.623±2.466	7.673±0.450
3_DNR	3.0	1.380±0.104	2.275±0.084	92.640±3.619	6.827±0.621

#### 4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน

เพื่อหาความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินที่ถูกปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับสัณฐานวิทยา โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคยางกับค่าความทนแรงกระแทก ผิวหน้าที่แตกหักของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน ถูกวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน แสดงในรูปที่ 4.14 จากผลการวิเคราะห์ รูปที่ 4.14 (a) มีลักษณะริ้ว ๆ ของพื้นผิวของอีพอกซีบริสุทธิ์ รูปที่ 4.14 (b)-(e) มีลักษณะของสองส่วนซึ่งประกอบด้วยอนุภาคยางและอีพอกซีเมทริกซ์



รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน



ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลในอีพอกซีเมทริกซ์ของแต่ละพอลิเมอร์ผสม แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง อาจเนื่องมาจากความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลและอีพอกซีเมทริกซ์ [16] เมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มมากขึ้น แรงกระทำระหว่างอนุภาคและเมทริกซ์จึงไม่มากพอ [17] นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 3 ส่วนในร้อยส่วน แสดงลักษณะของพื้นผิวที่เรียบมากซึ่งเป็นลักษณะของพื้นผิวที่เปราะและจะให้ค่าความทนแรงกระแทกต่ำ [52] ตารางที่ 4.7 แสดงขนาดของอนุภาคยางที่กระจายตัวในเมทริกซ์ของ 0.5\_DNR ใกล้เคียงกับของ 1\_DNR แต่อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 0.5 ส่วนในร้อยส่วน แสดงค่าความทนแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน เนื่องจากปริมาณของยางในพอลิเมอร์ผสม 1\_DNR มีปริมาณมากกว่า ปริมาณยางที่มากกว่าสามารถเพิ่มค่าความเหนียวของอีพอกซีเรซิน ได้มากกว่า [62] Kumar และ kothandaraman ได้ผลการวิจัยคล้ายงานวิจัยนี้ [27]

ตารางที่ 4.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลที่ปรากฏในพอลิเมอร์ผสม

ชนิดของพอลิเมอร์ผสม	ปริมาณยาง (phr)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยาง ( $\mu\text{m}$ )
0.5_DNR	0.5	14.09 $\pm$ 5.38
1_DNR	1.0	16.48 $\pm$ 6.23
2_DNR	2.0	54.93 $\pm$ 21.55
3_DNR	3.0	70.29 $\pm$ 24.46

จากสมบัติเชิงกลและสัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน สามารถสรุปได้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยปริมาณของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของยางเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน เพื่อศึกษาผลขององศาการกราฟที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน

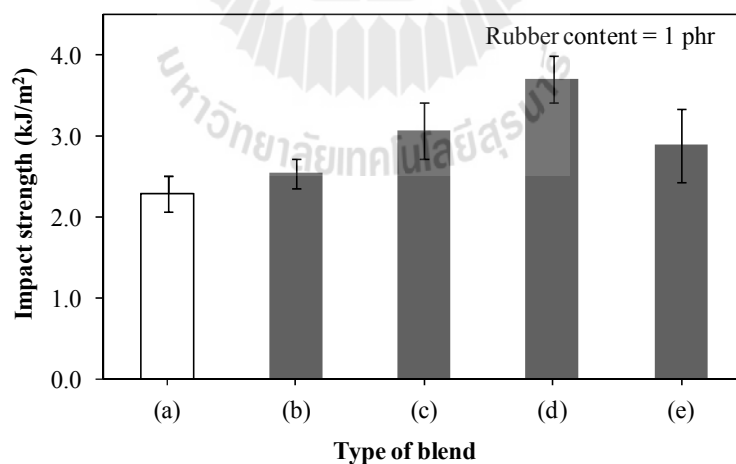
#### 4.4 สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน

การศึกษาผลขององศาการกราฟท์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน ทำโดยใช้ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ 3 ชนิด คือ 20\_2AIBN(L), 30\_2AIBN(L) และ 50\_2AIBN(L) ซึ่งมีองศาการกราฟท์เรียงตามลำดับ ดังนี้  $50\_2AIBN(L) > 30\_2AIBN(L) > 20\_2AIBN(L)$  ปริมาณของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่แสดงค่าความเหนียวสูงที่สุดตามที่รายงานในหัวข้อ 4.3

##### 4.4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน

###### 4.4.1.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน

ค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน แสดงไว้ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน; (a) Neat epoxy, (b) 1\_DNR, (c) 1\_20\_2AIBN(L), (d) 1\_30\_2AIBN(L) และ (e) 1\_50\_2AIBN(L)

การเติมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์เข้าไปในอีพอกซีเรซินสามารถเพิ่มค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซินได้ นอกจากนี้ ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซินมีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลกับอีพอกซีเรซิน ซึ่งเป็นไปตามคาด เนื่องจากยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์มีความเป็นขั้วมากกว่ายางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ยิ่งกว่านั้นยังมีหมู่อีพอกซีของไกลซิดิเลเมทาคริเลตซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างอนุภาคของยางกับอีพอกซีเมทริกซ์ ค่าความทนแรงกระแทกของ 1\_DNR, 1\_20\_2AIBN(L), 1\_30\_2AIBN(L) และ 1\_50\_2AIBN(L) เท่ากับ 2.544, 3.064, 3.703 และ 2.888 กิโลจูล/ตารางเมตรตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีบริสุทธิ์ ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10%, 34%, 63% และ 26% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารกราฟท์ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีของ 1\_50\_2AIBN(L) ผลที่ได้ อาจมีสาเหตุมาจากการเพิ่มของหมู่เอคริลิกของเมทิลเมทาคริเลตและหมู่อีพอกซีของไกลซิดิเลเมทาคริเลตบนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลส่งผลให้เพิ่มความเข้ากันและเพิ่มการยึดติดระหว่างยางกับอีพอกซีเมทริกซ์ นำไปสู่การส่งผ่านความเค้นจากเมทริกซ์ดีขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย 1 ส่วนในร้อยละของ 30\_2AIBN(L) แสดงค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากความสมดุลระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและองศาการกราฟท์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ (ดูหัวข้อ 4.2.3) ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย 1 ส่วนในร้อยละของ 50\_2AIBN(L) แสดงค่าความทนแรงกระแทกต่ำกว่าของ 1\_30\_2AIBN(L) ถึงแม้ว่า 50\_2AIBN(L) จะมีองศาการกราฟท์สูงกว่า อาจเป็นเพราะลักษณะความแข็งของโครงสร้างเมทิลเมทาคริเลตที่กราฟท์อยู่บนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะกระทำตัวเป็นอนุภาคยางที่นุ่ม นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของยางยังส่งผลต่อความเหนียวของอีพอกซีเรซินด้วย น้ำหนักโมเลกุลของ 50\_2AIBN(L) ต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ตัวอื่น ๆ ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอาจไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการเพิ่มความเหนียวให้กับอีพอกซีเรซิน รายงานการวิจัยในปีพุทธศักราช 2549 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าของยางธรรมชาติที่ถูกรีดอีพอกซีไคซ์จะเพิ่มสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินได้ดีกว่า [40] เหตุผลอื่นที่เป็นไปได้ อาจเนื่องมาจาก 30\_2AIBN(L) มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่าของ 50\_2AIBN(L) (ดูตารางที่ 4.9) ในปีพุทธศักราช 2534 รายงานการปรับปรุงอีพอกซีด้วยยางแสดงให้เห็นว่า การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าสามารถเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีได้ดีกว่า [57]

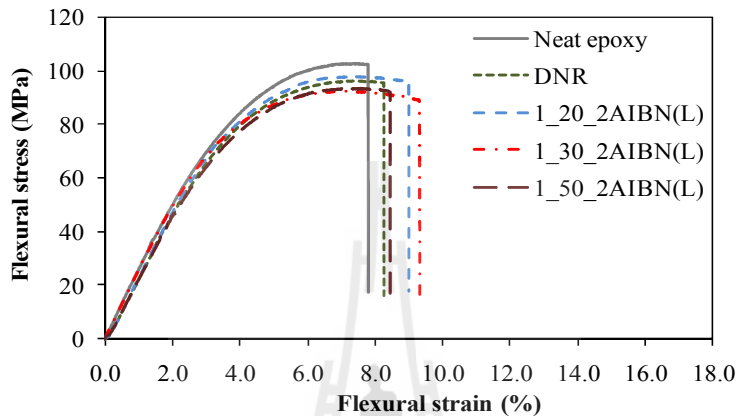
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซินสรุปในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน  
(ปริมาณยางเท่ากับ 1 ส่วนในร้อยส่วน)

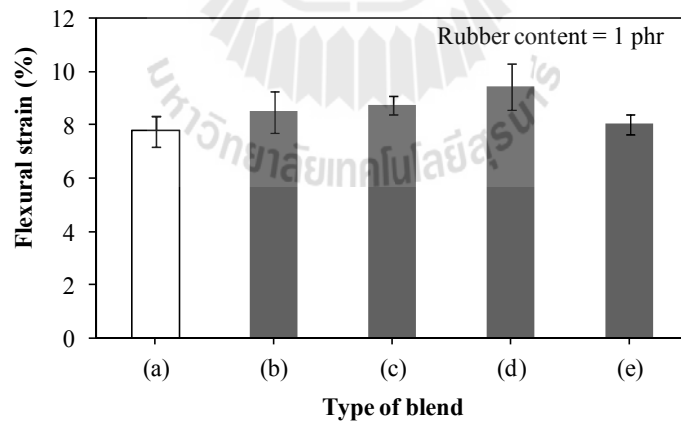
ชนิดของพอลิเมอร์	ความทนแรงกระแทก(kJ/m <sup>2</sup> )	มอดูลัสตัดโค้ง (GPa)	ความต้านแรงตัดโค้ง(MPa)	ความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด (%)
Neat epoxy	2.292±0.224	2.504±0.106	99.488±2.440	7.771±0.582
1_DNR	2.544±0.179	2.368±0.065	96.008±4.125	8.482±0.768
1_20_2AIBN(L)	3.064±0.343	2.359±0.157	95.379±2.281	8.734±0.345
1_30_2AIBN(L)	3.703±0.297	2.387±0.054	95.268±3.501	9.415±0.622
1_50_2AIBN(L)	2.888±0.457	2.362±0.101	95.712±3.847	8.014±0.363

#### 4.4.1.2 สมบัติการตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน

ความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด (flexural strain at break, %) ของอีพอกซีเรซินเพิ่มขึ้นเมื่อผสมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ แสดงในรูปที่ 4.16- 4.17



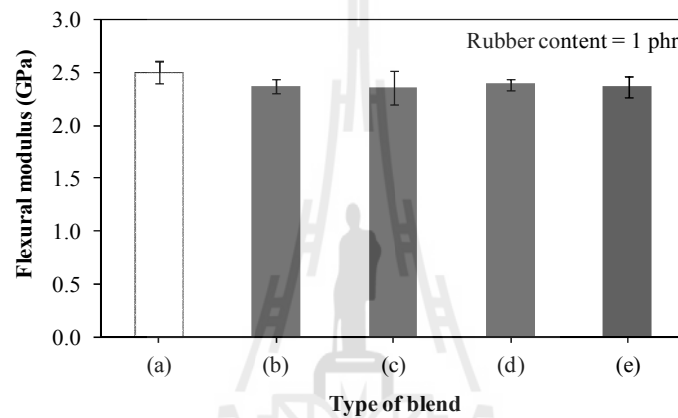
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน



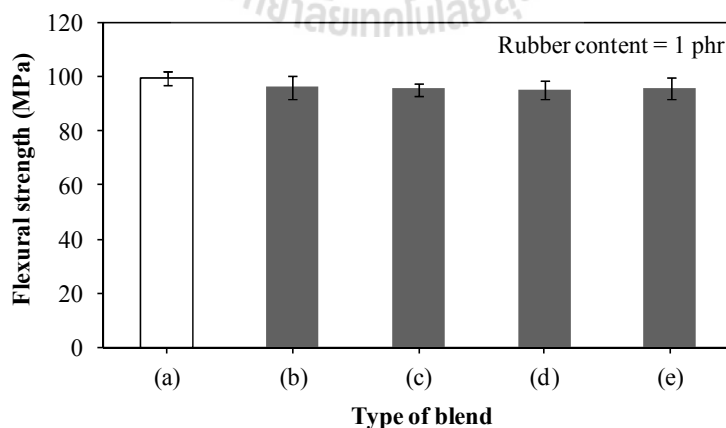
รูปที่ 4.17 ความเครียดตัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน; (a) Neat epoxy, (b) 1\_DNR, (c) 1\_20\_2AIBN(L), (d) 1\_30\_2AIBN(L) และ (e) 1\_50\_2AIBN(L)

โดยทั่วไป ความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์เท่ากับ 1 ส่วนในร้อยละเพิ่มขึ้น

ตามองศาการกราฟท์ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย 50\_2AIBN(L) สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย 30\_2AIBN(L) ให้ค่าความเครียดดัดโค้งสูงสุด ซึ่งแสดงว่าองศาการกราฟท์ที่มีผลต่อความเหนียวของอีพอกซีที่ปรับปรุงด้วยยางกราฟท์ อาจสรุปได้ว่าความเข้ากันระหว่างยางและอีพอกซีเมทริกซ์เพิ่มขึ้นและนำไปสู่การเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ 1\_50\_2AIBN(L) ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด มีความแตกต่างไปจากแนวโน้มสามารถอธิบายเหมือนกับผลของค่าความทนแรงกระแทกในทางตรงข้ามกับความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด โมดูลัสดัดโค้งและความต้านแรงดัดโค้งลดลงเล็กน้อยเมื่อผสมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์เข้าไปในอีพอกซีเรซิน ดังรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 ตามลำดับ



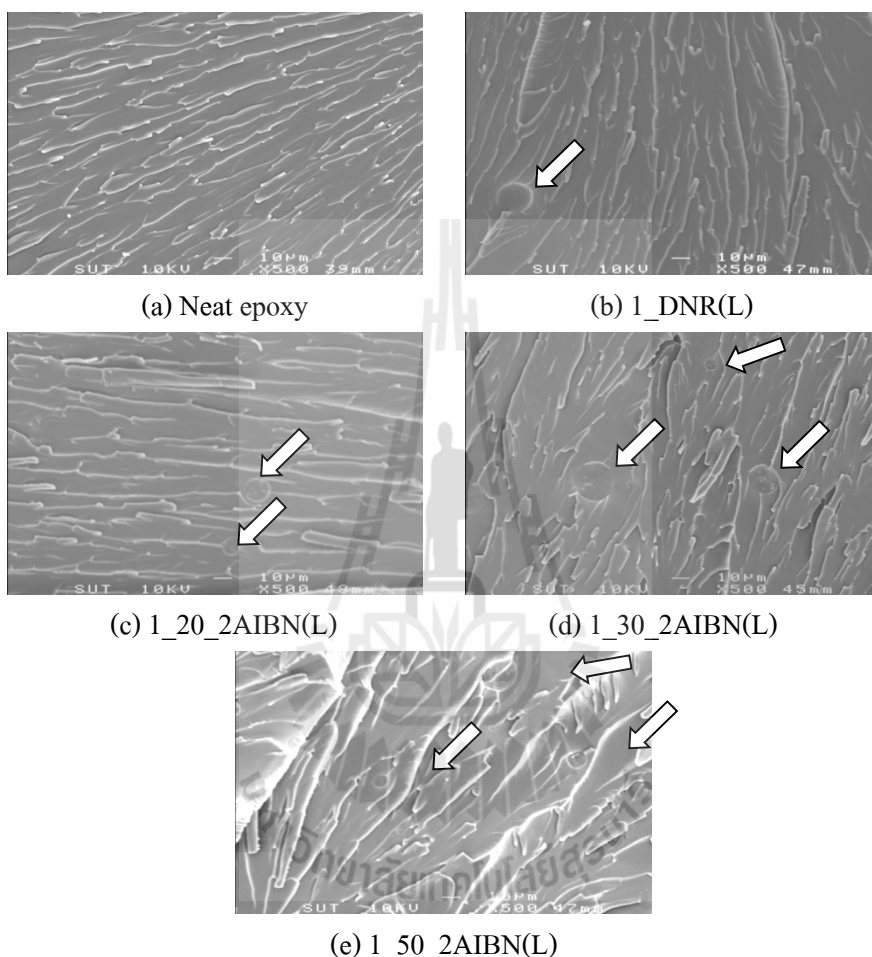
รูปที่ 4.18 โมดูลัสดัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน; (a) Neat epoxy, (b) 1\_DNR, (c) 1\_20\_2AIBN(L), (d) 1\_30\_2AIBN(L) และ (e) 1\_50\_2AIBN(L)



รูปที่ 4.19 ความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน; (a) Neat epoxy, (b) 1\_DNR, (c) 1\_20\_2AIBN(L), (d) 1\_30\_2AIBN(L) และ (e) 1\_50\_2AIBN(L)

#### 4.4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน แสดงในรูป 4.20 (a)-(e)



**รูปที่ 4.20** ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์กับอีพอกซีเรซิน (ลูกศรแสดงอนุภาคยาง)

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยาง แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่มีขนาดเล็กกว่าของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์โดยทั่ว ๆ ไปลดลงเมื่อองศาการกราฟท์เพิ่มขึ้น

อาจเป็นเพราะความเข้ากันระหว่างยางและเมทริกซ์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมอนเมอร์ที่ถูกกราฟท์ลงบนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์

สรุปได้ว่า การยึดติดระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์และอีพอกซี เมทริกซ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้กรณีของ 1\_30\_2AIBN(L) อนุภาคของยางแสดงขนาดต่าง ๆ กัน อาจเป็นสาเหตุของการเพิ่มความเหนียว การกระจายขนาดอนุภาคที่สูงสามารถเพิ่มความเหนียวได้ดีขึ้น [57] หรืออาจเนื่องมาจากผลของการกระจายขนาดอนุภาคของยางร่วมกับผลของความเข้ากันระหว่างยางและอีพอกซีเมทริกซ์ ดังนั้น ความเหนียวของ 1\_30\_2AIBN(L) จึงสูงกว่าของ 1\_50\_2AIBN(L)

**ตารางที่ 4.9** ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านและไม่ผ่านการกราฟท์ที่ปรากฏในพอลิเมอร์ผสม

ชนิดของพอลิเมอร์ผสม	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยาง (ไมโครเมตร)
1_DNR	16.48±6.23
1_20_2AIBN(L)	13.41±4.15
1_30_2AIBN(L)	11.15±8.82
1_50_2AIBN(L)	11.84±4.92

#### 4.5 สมบัติเชิงกลและลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติกับเส้นใยป่านศรนารายณ์

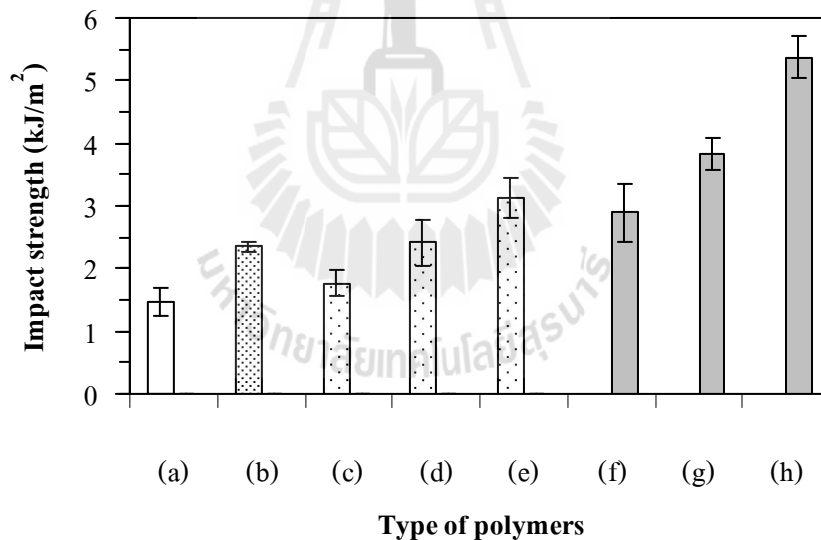
จากผลการวิจัยที่นำเสนอไว้ข้างต้น พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ชนิด 30\_2AIBN(L) กับอีพอกซีเรซิน แสดงค่าความเหนียวสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีค่ามอดูลัสดัดโค้งและค่าความต้านแรงดัดโค้งต่ำกว่าอีพอกซี-บริสทุทรีอยู่เล็กน้อย เพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีทั้งความเหนียวและความแข็งแรงไปพร้อม ๆ กัน การวิจัยในครั้งนี้ จึงศึกษาถึงการใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นเส้นใยเสริมแรงแก่อีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ชนิด 30\_2AIBN(L) พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิเมอร์ผสม เตรียมขึ้น โดย ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของเส้นใย 3 สัดส่วน ได้แก่ 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอีพอกซีเรซิน นอกจากนี้ เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้สารประสานไซเลนชนิดแกมมา-ไกลซิโดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน ( $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilane) ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต เส้นใยป่านศรนารายณ์



ที่ใช้แบ่งเป็นชนิดที่ผ่านเฉพาะการทำแอลคาไลเซชัน และชนิดที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลนชนิดดังกล่าวด้วย

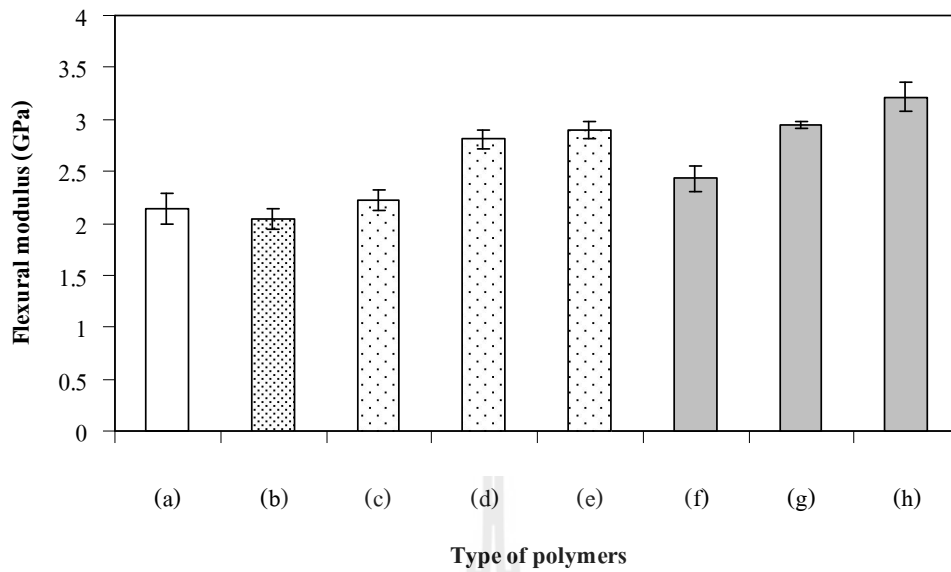
#### 4.5.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

ค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและเส้นใยป่านสรนารายณ์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 จากรูปจะเห็นได้ว่าการเติมเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านเฉพาะการทำแอลคาไลเซชัน และปริมาณเส้นใยเท่ากับ 3-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลให้ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงต่ำกว่าค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การเติมเส้นใยในปริมาณต่ำมีผลให้ความต่อเนื่องของเนื้อเมทริกซ์ลดลง ในขณะที่ปริมาณเส้นใยที่ช่วยรับแรงกระแทกมีปริมาณน้อย แต่เมื่อมีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยสารประสานไซเลน มีผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ทุกอัตราส่วนเส้นใย

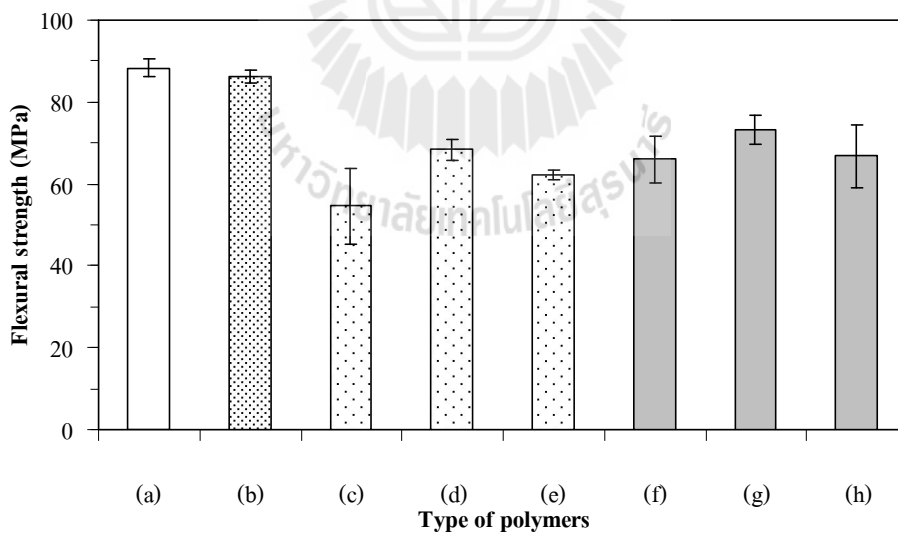


รูปที่ 4.21 ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite\_3% A-sisal (d) Composite\_5% A-sisal (e) Composite\_7% A-sisal (f) Composite\_3% silane-A-sisal (g) Composite\_5% silane-A-sisal และ (h) Composite\_7% silane-A-sisal

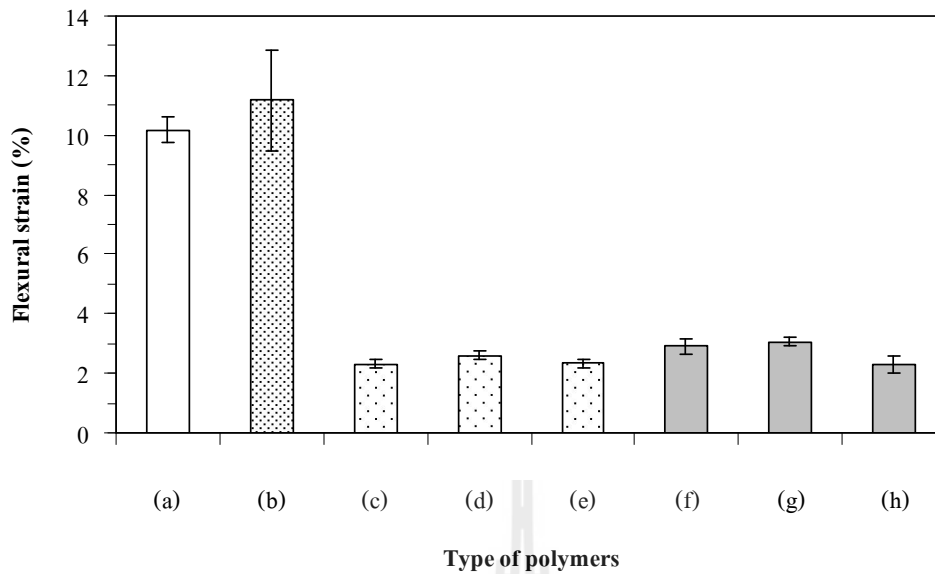
รูปที่ 4.22 -4.24 แสดง ค่ามอดูลัสตัดโค้ง ค่าความต้านแรงตัดโค้ง และค่าความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด ของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสม [Epoxy blend] และพอลิเมอร์คอมโพสิต



รูปที่ 4.22 มอดุลัสดัดโค้งของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite\_3% A-sisal (d) Composite\_5% A-sisal (e) Composite\_7% A-sisal (f) Composite\_3% silane-A-sisal (g) Composite\_5% silane-A-sisal และ (h) Composite\_7% silane-A-sisal



รูปที่ 4.23 ความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต; (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite\_3% A-sisal (d) Composite\_5% A-sisal (e) Composite\_7% A-sisal (f) Composite\_3% silane-A-sisal (g) Composite\_5% silane-A-sisal และ (h) Composite\_7% silane-A-sisal



**รูปที่ 4.24** ความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต;  
 (a) Epoxy (b) Epoxy blend (c) Composite\_3% A-sisal (d) Composite\_5% A-sisal  
 (e) Composite\_7% A-sisal (f) Composite\_3% silane-A-sisal (g) Composite\_5% silane-A-sisal และ (h) Composite\_7% silane-A-sisal

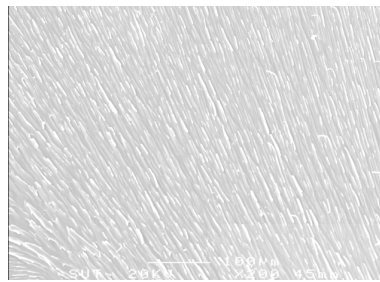
จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า เส้นใยป่านขนารายณ์ที่ใช้เสริมแรงให้แก่พอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและยางธรรมชาติดัดแปรนั้น มีผลให้ค่ามอดูลัสดัดโค้งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามคาด เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงกว่าอีพอกซีเรซิน แต่การเติมเส้นใยลงไปในพอลิเมอร์ผสมมีผลให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งลดลง (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.23) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดี ทำให้เกิดจุดรวมความเค้น พอลิเมอร์แตกหักด้วยแรงที่ต่ำลง การปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยป่านขนารายณ์ด้วยการใช้สารประสานไซเลนเป็นแนวการลดปัญหานี้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีการเพิ่มขึ้นของความต้านแรงดัดโค้งเมื่อเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้เส้นใยป่านขนารายณ์ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไซเลน แต่อย่างไรก็ตาม แรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นยังไม่มากเพียงพอที่จะทำให้ ความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าอีพอกซีและอีพอกซีผสมกับยางธรรมชาติดัดแปร สำหรับกรณีของความเครียดดัดโค้ง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมโพสิตทุกชนิดตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.24 ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินและอีพอกซีเรซินปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติดัดแปร ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากเส้นใยป่านขนารายณ์มีความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีค่าต่ำ (%Elongation of sisal fiber = 2.0-2.5 [66]) ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของอีพอกซี พอลิ-เมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิต

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน พอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิตของอีพอกซีเรซิน

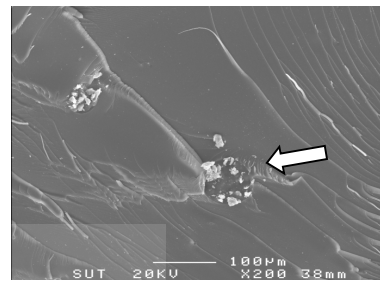
ชนิดของพอลิเมอร์	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	มอดูลัสตัดโค้ง (GPa)	ความต้านแรงตัดโค้ง (MPa)	ความเครียดตัดโค้ง ณ จุดขาด (%)
Epoxy	1.456±0.225	2.135±0.136	88.373±2.158	10.182±0.437
Epoxy blend	2.359±0.079	2.044±0.097	86.258±1.60	11.164±1.672
Composite_3% A-sisal	1.765±0.214	2.222±0.096	54.635±9.320	2.313±0.150
Composite_5% A-sisal	2.406±0.374	2.814±0.086	68.313±2.736	2.593±0.135
Composite_7% A-sisal	3.116±0.317	2.800±0.082	62.285±1.300	2.337±0.136
Composite_3% silane-A-sisal	2.886±0.446	2.426±0.125	65.971±5.638	2.907±0.269
Composite_5% silane-A-sisal	3.816±0.259	2.950±0.033	73.337±3.512	3.056±0.137
Composite_7% silane-A-sisal	5.386±0.337	3.209±0.145	66.863±7.694	2.296±0.269

#### 4.5.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต

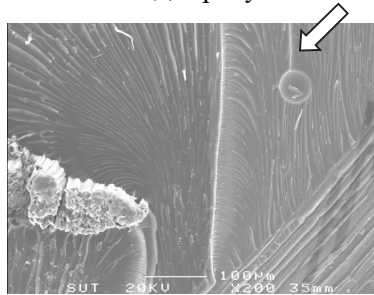
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่แตกหักของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงไว้ในรูปที่ 4.25



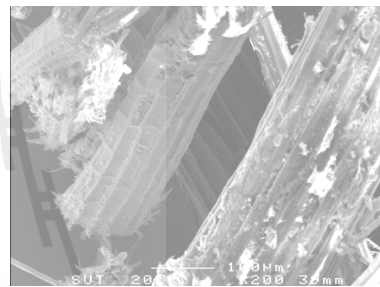
(a) Epoxy



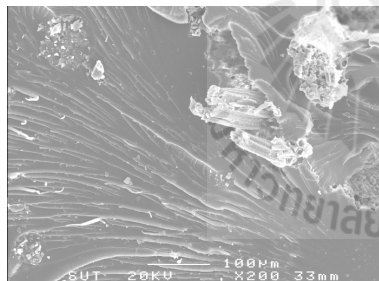
(b) Epoxy blend



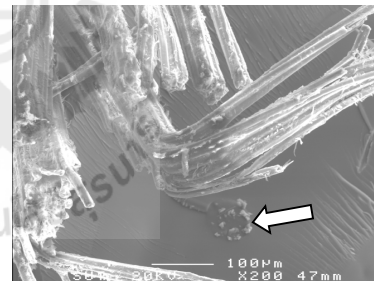
(c) Composite\_3% A-sisal



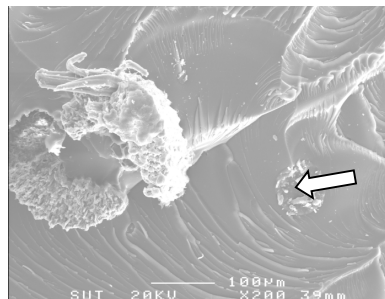
(d) Composite\_3% silane-A-sisal



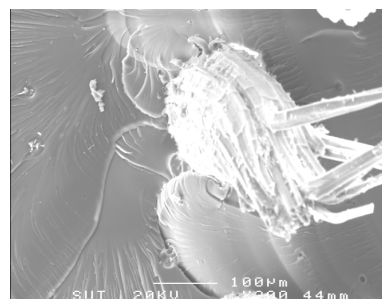
(e) Composite\_5% A-sisal



(f) Composite\_5% silane-A-sisal



(g) Composite\_7% A-sisal



(h) Composite\_7% silane-A-sisal

รูปที่ 4.25 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิต (ถูกสรแสดงอนุภาคยาง)

เมื่อสังเกตที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะเห็นได้ว่า กระจกที่ใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ซึ่งผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารประสานไฮดรอกไซด์ ช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีขนาดลดลง และเส้นใยมีลักษณะการฉีกขาดเป็นเส้นเล็ก สิ่งนี้จึงน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดดังกล่าวมีค่าความทนแรงกระแทก ค่ามอดูลัสดัดโค้ง และความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่ากระจกใช้เส้นใยที่ผ่านเพียงการทำแอลคาไลเซชัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.10



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล (DNR) ที่เตรียมขึ้นตามวิธีของ Tanaka และคณะ [30] ได้ น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 55,984 กรัม/โมล และ 2.420 ตามลำดับ จาก การศึกษาผลของชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และความเข้มข้นของ มอนอเมอร์ ต่อองค์การกราฟท์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ด้วยมอนอ- เมอร์ผสมของเมทิลเมทาคริเลตกับ ไกลซิซิลเมทาคริเลต พบว่า เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ให้ องค์การกราฟท์สูงกว่าเอโซบิสไอโซบิวทิลโรโนไตรัล (AIBN) อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติที่ลด น้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์โดยใช้ BPO เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาไม่สามารถละลายได้อย่าง สมบูรณ์ในอีพอกซีเรซิน ดังนั้นจึงใช้ AIBN เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในกระบวนการกราฟท์ เพื่อศึกษา ผลของความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาและความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่อองค์การกราฟท์

ที่ปริมาณมอนอเมอร์เท่ากัน พบว่า ปริมาณรวมของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซิซิลเมทาคริเลต ที่กราฟท์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 2 ส่วน ในร้อยละ แต่เมื่อปริมาณของความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 3 ส่วนในร้อยละมีผลให้ ปริมาณรวมของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซิซิลเมทาคริเลตลดลง ผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ แสดงว่า ปริมาณรวมของเมทิลเมทาคริเลตและไกลซิซิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความ เข้มข้นของมอนอเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์มีค่า ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้มอนอเมอร์ผสมในกระบวนการกราฟท์

ผลของปริมาณยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิ- เมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลแสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ผสม ที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลปริมาณ 1 ส่วนในร้อยละ มีความต้านทานต่อแรง กระแทกและความเครียดคดโค้งสูงสุด ค่ามอดุลัสคดโค้งและค่าความต้านแรงคดโค้งลดลง ลักษณะ ทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนคือ อนุภาคยางและอีพอกซี เมทริกซ์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น

ผลขององค์การกราฟท์ของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ต่อสมบัติ เชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนัก

โมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์แสดงให้เห็นว่า กราฟท์โคพอลิเมอร์สามารถเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเมทริกซ์ได้ พอลิเมอร์ผสมชนิด 1\_30\_2AIBN ให้ค่าความเหนียวสูงที่สุด ค่าความทนแรงกระแทกและความเครียดคดโค้งเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มองศาการกราฟท์ ยกเว้นกรณีของพอลิเมอร์ผสมชนิด 1\_50\_2AIBN ค่ามอดุลัสคดโค้งและความต้านแรงคดโค้งลดลงเมื่อเติมยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์โดยทั่ว ๆ ไป ลดลงเมื่อองศาการกราฟท์เพิ่มขึ้น

การศึกษาเส้นใยป่านสรนารายณ์เสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีและยางธรรมชาติลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งผ่านการกราฟท์ที่เพิ่มความทนแรงกระแทกสูงสุดแก่อีพอกซี พบว่ากรณีที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการทำแอลคาไลเซชันมีผลให้ ความทนแรงกระแทกลดลงเมื่อเส้นใยเท่ากับ 3-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มเป็น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับการเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยसानประสานไซเลน พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทุกอัตราส่วนของเส้นใย สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ค่ามอดุลัสคดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม และมีค่าสูงยิ่งขึ้นสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยसानประสานไซเลน ความต้านแรงคดโค้งและความเครียดคดโค้ง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสม แต่มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยที่ผ่านทั้งการทำแอลคาไลเซชันและการปรับสภาพพื้นผิวด้วยसानประสานไซเลน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริมาณเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่สูงนัก ในงานวิจัยลำดับต่อไปควรศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณเส้นใยให้สูง ๆ และทำการทดลองใช้เส้นใยในรูปแบบของเส้นใยสั้นที่ปั่นให้มีขนาดเส้นใยสั้นมาก ๆ ซึ่งอาจช่วยรับแรงในทุกทิศทางเท่า ๆ กัน นอกจากนี้ อาจศึกษาถึงการใช้อย่างธรรมชาติคดแปรจากงานวิจัยนี้ เพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ด้วย



### บรรณานุกรม

1. งามทิพย์ ภู่วโรดม (2002) **KU-GREEN: ภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากมัน**  
**ตำปะหลัง**: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน : Available URL:  
[http://ku.ac.th/research\\_good1.html](http://ku.ac.th/research_good1.html)
2. Mohanty, A.K., Misra, M. and Rrzal L.T. (2005). **Natural fibers, Biopolymers and Biocomposites**, Taylor&Francis, Boca Raton.
3. Budiman, A.F.S. (2002). **Natuur rubber newsletter**, 28, 4<sup>th</sup> quarter.
4. Zainol, I., Ahmad, M. I., Zakaria, F.A., Ramli, A., Marzuki, H.F.A. and Aziz, A.A. (2006). Modification of epoxy resin using liquid natural rubber. **Mater. Sci. Forum.** 517: 272-274.
5. Mathew, A.P. and Thomas, S. (2001). Izod impact behavior of natural rubber/polystyrene interpenetrating polymer network, **Mater. Lett.**, 50:154-163.
6. Jin, H.-J., Chin I.-J., Kim, M.-N., Kim, S.-H., Yoon, J.-S (2000). Blending of poly(l-lactic acid) with poly(cis-1,4-isoprene). **Eur. Polym. J.**, 36:165-169.
7. Philpot, R.J., Buckmiller, D.K., Welsh, E.R., Erickson, D.W. (2002) **US Patent no. 6,352,485.**
8. Shino, T. (2006) **US Patent no. 7,131,920.**
9. Li, Y., Mai, Y.-W., Ye, L. (2000) Sisal fiber and its composites: a review of recent developments. **Compos. Sci. Technol.**, 60:2037-2055.
10. Garkhail, S. K., Heijenrath, R. W. H., Peijs, T. (2000). Mechanical properties of natural fiber-mat-reinforced thermoplastics based on flax and polypropylene. **Appl. Compos. Mater.** 7 :351-372..
11. de Bruijn, J. C. M.(2000). Natural fiber mat thermoplastic products from a processor's point of view. **Appl. Compos. Mater.**, 7:415-420.
12. Sanadi, A. R. and Caulfield D. F. (2000). Transcrystallization interphase in natural fiber-PP composites: effect of coupling agent. **Compos. Interf.** 7:31-43.
13. Varma, D. S., Varma, M., Varma, I. K. (1984). Coir fibers Part I: Effect of physical and chemical treatments on properties. **Text. Res. J.** 54:827-832.
14. Joseph, K., Thomas, S. and Pavithran, C. (1996). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. **Polymer** 37:5139-5149.

15. Arends, C.B.(1996). **Polymer toughening**. New York: Marcel Dekker.
16. Saadati, P., Baharvand, H., Rahimi, A., and Morshedian, J. (2005). Effect of modified liquid rubber on increasing toughness of epoxy resins. **Iran. Polym. J.** 14: 637-646.
17. Ramos, V.D., Costa, H.M.D., Soares, V.L.P., and Nascimento, R.S.V. (2005). Modification of epoxy resin: a comparison of different types of elastomer. **Polym. Test.** 24: 387-394.
18. Jin, F.L. and Park, S.J. (2007). Improvement in fracture behaviors of epoxy resins toughened with sulfonated poly(ether sulfone). **Polym. Degrad. Stab.** 92: 509-514.
19. Zhi-hua, L., Yao-peng, H., Dong-yan, R., and Zi-qiao, Z. (2008). Structural characteristics and properties of polyurethane modified TDE-85/MeTHPA epoxy resin with interpenetrating polymer networks. **J. Cent. South Univ. Technol.** 15: 305-308.
20. Zhou, Y.X., Wu, P.X., Cheng, Z.Y., Ingram, J., and Jeelani, S. (2008). Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube. **eXPRESS Polym. Lett.** 2: 40-48.
21. Chikhi, N., Fellahi, S., and Bakar, M. (2002). Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber. **Eur. Polym. J.** 38: 251-264.
22. Huang, Y. and Kinloch, A.J. (1992). The toughness of epoxy polymer containing microvoids. **Polymer.** 33: 1330-1332.
23. Ismail, Z., Ahmad, M.I., Zakaria, F.A., Anita, R., Marzuki, H.F.A., and Aziz, A.B., (2006). Modification of epoxy resin using liquid natural rubber. **J. Mater. Sci.** 517: 272-274.
24. Rubber Research Institute of Thailand. (2007). [Online]. Available: <http://www.rubberthai.com/information/information.htm>
25. Charmondusit, K, Kiatkamjornwong, S., and Prasassarakich., P. (1998). Grafting of methyl methacrylate and styrene onto natural rubber. **J. Sci. Chula. Univ.** 23: 167-181.
26. Chuayjuljit, S., Soatthiyanon, N., and Potiyaraj, P. (2006). Polymer blends of epoxy resin and epoxidized natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 102: 456-459.
27. Kumar, K.D.and Kothandaraman, B. (2008). Modification of (DGEBA) epoxy resin with maleated depolymerised natural rubber. **eXPRESS Polym. Lett.** 2: 302-311.
28. Nor, H.M. and Ebdon, J.R. (2000). Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution part 1. A study by GPC and FTIR spectroscopy. **Polymer.** 41: 2359-2365.

29. Suksawad, P. and Sakdapipanich, J. (2005) Preparation of telechelic low molecular-weight natural rubber latex by photo chemical degradation using TiO<sub>2</sub> film as a photocatalyst. **31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand**. Suranaree University of Technology.
30. Tanaka, Y., Sakaki, T., Kawasaki, A., Hayashi, M., Kanamaru, K., and Shibata, K. (1999). **US Pat.** 5,856,600.
31. Nakason, C., Kaesaman, A., and Supasanthitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. **Polym. Test.** 23: 35-41.
32. Irfan, M.H. (1998). **Chemistry and technology of thermosetting polymers in construction applications**. Boston: Kluwer academic publishers.
33. Goodman, S.H. (1998). **Handbook of Thermoset Plastics**. (2<sup>nd</sup> ed.). California: Noyes Publications.
34. Chiraphaphisarn N. (1997). **A study of the properties of liquid rubber filled epoxy resin**. M.S.thesis, Mahidol University, Thailand.
35. Mark, H.F. (2003). **Encyclopedia of polymer science and technology**. (3<sup>th</sup> ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, 9: 730-739.
36. Lee, H. and Neville, K. (1982). **Handbook of epoxy resins**. New York: McGraw-Hill, Inc.
37. Bhowmick, A.K. and Stephens, H.L. (2001). **Handbook of elastomers**. (2<sup>nd</sup> ed.). New York: Marcel Dekker.
38. Nakason, C., Kaesaman, A., and Yimwan, N. (2003). Preparation of graft copolymers from deproteinized and high ammonia concentrated natural rubber latices with methyl methacrylate. **J. Appl. Polym. Sci.** 87: 68-75.
39. Suriyachi, P., Kiatkamjornwong, S. and Prasassarakich, P. (2004). Natural rubber-g-glycidyl methacrylate/styrene as a compatibilizer in natural rubber/PMMA blends. **Rubber Chem. and Technol.** 77: 914-930.
40. Thongpin, C., Wongtimnoi, K., Kamolsawat, J., and Rotkasem, P. (2006). Feasibility study of binder synthesis from natural rubber for use in making running tracks in Thailand. **The 32<sup>nd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT 2006)**. Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand.
41. Siri-Upathum, C. and Boonyawat, J. (2007). Preparation of low allergenic protein concentrated natural rubber latex using suitable low molecular weight cellulose derivatives

- induced by gamma irradiation. **10<sup>th</sup> Conference on Nuclear Science and Technology**. Bangkok International Trade and Exhibition Centre (BITEC) Bangkok, Thailand.
42. Okwu, U.N. and Akinlabi, A.K. (2007). Production of low-molecular-weight natural rubber: comparative assessment of a nonchemical route. **J. Appl. Polym. Sci.** 106: 1291-1293.
  43. Phinyocheep, P. and Duangthong, S. (2000). Ultraviolet-curable liquid natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 78: 1478-1485.
  44. Isa, S.Z., Yahya, R., Hassan, A., and Tahir, M. (2007). The influence of temperature and reaction time in the degradation of natural rubber latex. **Malaysian J. Anal. Sci.** 11: 42-47.
  45. Halasa, A.F., Massie, J.M., and Ceresa, R.J. (2005). **The science and technology of rubber**. (3<sup>th</sup> ed.). In: Mark, J.E., Berman, B. and Eirich, F.R., editor. Elsevier Inc. pp. 497.
  46. Nghia, P.T., Onoe, H., Yamamoto, Y., and Kawahara, S. (2008) Hydrogenation of natural rubber having epoxy group. **Colloid Polym. Sci.** 286: 993-998.
  47. Lehrle, R.S. and Willist, S.L. (1997). Modification of natural rubber: a study to assess the effect of vinyl acetate on the efficiency of grafting methyl methacrylate on rubber in latex form, in the presence of azo-bis-isobutyronitrile. **Polymer.** 38: 5937-5946.
  48. Oliveira, P.C., Guimaraes, A., Cavaillé, J., Chazeau, L., Gilbert, R.G., and Santos, A.M. (2005). Poly(dimethylaminoethyl methacrylated) grafted natural rubber from seeded emulsion polymerization. **Polymer.** 46:1105-1111.
  49. George, V., Britton, I.J. and Sebastian, M.S. (2003). Studies on radiation grafting of methyl methacrylate onto natural rubber for improving modulus of latex film. **Radiat. Phys. Chem.** 66: 367-372.
  50. Derouet, D., Intharapat, P., Tran, O.N., Gohier, F. and Nakason, C. (2009). Graft copolymers of natural rubber and poly(dimethyl(acryloyloxymethyl) phosphonate) (NR-g-PDMAMP) or poly(dimethyl(methacryloyloxyethyl) phosphonate) (NR-g-PDMMEP) from photopolymerization in latex medium. **Eur. Polym. J.** 45: 820-836.
  51. Collyer, A.A. (1994). **Rubber toughened engineering plastics**. London: Chapman & Hall.
  52. Ratna, D. (2001). Phase separation in liquid rubber modified epoxy mixture. Relationship between curing conditions, morphology and ultimate behavior. **Polymer.** 42: 4209-4218.
  53. Kong, J., Ning, R., and Tang, Y. (2006). Study on modification of epoxy resins with acrylate liquid rubber containing pendant epoxy groups. **J. Mater. Sci.** 41:1639-1641.

54. Rutnakornpituk, M. (2005). Modification of epoxy-novolac resins with polysiloxane containing nitrile functional groups: synthesis and characterization. **Eur. Polym. J.** 41: 1043-1052.
55. SpecialChem Innovation & Solutions. (2008). Impact Modifiers Center [On-line]. Available: [http://www.specialchem4polymers.com/tc/Acrylic-impact Modifiers/index.aspx?id=2905](http://www.specialchem4polymers.com/tc/Acrylic-impact%20Modifiers/index.aspx?id=2905)
56. Barcia, F.L., Amaral, T.P., and Soare, B.G. (2003). Synthesis and properties of epoxy resin modified with epoxy-terminated liquid polybutadiene. **Polymer.** 44: 5811-5819.
57. Pearson, R.A. and Yee, A.F. (1991). Influence of particle size and particle-size distribution on toughening mechanisms in rubber-modified epoxies. **J. Mater. Sci.** 26: 3828-3844.
58. Ratna, D. and Banthia, A.K. (2007). Reactive acrylic liquid rubber with terminal and pendant carboxyl groups as a modifier for epoxy resin. **Polym. Eng. Sci.** 47: 26-33.
59. Bagheri, R. and Pearson, R.A. (1996). Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: I. Microvoid toughening. **Polymer.** 37: 4529-4538.
60. Bagheri, R. and Pearson, R.A. (2000). Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: II. Inter-particle distance. **Polymer.** 41: 269-276.
61. Ratna, D., Banthia, A.K., and Deb, P.C. (2000). Toughening of epoxy resin using acrylate-based liquid rubbers. **J. Appl. Polym. Sci.** 78: 716-723.
62. Thomas, R., Yumei, D., Yuelong, H., Le, Y., Moldenaers, P., Weimin, Y., Czigany, T., and Tomas, S. (2008). Miscibility, morphology, thermal, and mechanical properties of a DGEBA based epoxy resin toughened with a liquid rubber. **Polymer.** 49: 278-294.
63. คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาไร่พืชนา. บทปฏิบัติการที่ 23 ป่านศรนารายณ์ (sisal).(online). Available URL: <http://agri.kps.ku.ac.th/agron/lesson23.shtml>.
64. Kumar, R. P., Manikanda Nair, K. C., Thomas, S., Schit, S.C. and Ramaburthy, K. (2000). Morphology and melt rheological behaviour of short-sisal-fibre-reinforced SBR composite. **Compos. Sci. and Technol.** 60:1737-1751.
65. Mohanty, A.K., Misra, M., Drzal, L.T. (2002). Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green materials World. . **J. Polym. Environ.** 10:19-26.
66. Bledzki, A. K., Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. **Prog. Polym. Sci.** 24: 221-274.

67. Murherjee, P. S., Satyanarayana, K. G. (1984). Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1. Sisal fibre. **J. Mater. Sci.** 19:3925-3934.
68. Li, Y., Hu, C., Yu, Y. (2008). Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. **Composites: Parts A**, 39:570-578.
69. Chow, C.P.L., Xing, X.S., Li, R.K.Y. (2007) Moisture absorption studies of sisal fiber reinforced polypropylene composites. **Compos. Sci. Technol.** 67:306-313.
70. Luyt, A.S., Malunka, M.E. (2005). Composites of low density polyethylene and short sisal fibers: the effect of wax addition and peroxide treatment on thermal properties. **Thermochim Acta.** 426:101-107.
71. Joseph, K., Varghese, S., Kalaprasad, G., Thomas, S., Prasannakumari, L., Koshy, P. and Pavithran, C. (1996). Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fiber reinforced polymer composites. **Eur. Polym. J.** 32:1243-1250.
72. Bisanda, E.T.N. (2000). The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibers. **Appl. Compos. Mater.** 7:331-339.
73. Megiatto Jr., J.D., Silva, C.G., Rosa, D.S., Frollini, E.(2008). Sisal chemically modified with lignins: Correlation between fibers and phenolic composites properties. **Polym. Degrad. Stab.** 93:1109-1121.
74. Alvarez, V.A., Vazquez, A. (2006). Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites. **Composites Part A.** 37:1672-1680.
75. Pongprayoon, T., Yanumet N., Sangthong, S. (2008). Surface behavior and film formation analysis of sisal fiber coated by poly(methyl methacrylate) ultrathin film. **Colloids Surf., A.** 320:130-137
76. Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Compos. Sci. and Technol.** 61:1437-1447.
77. Antich, P., Vazquez, A., Mondragon, I., Bernal, C. (2006). Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers. **Composite: Part A** 37:139-150.
78. Jacob, M., Thomas, S., Varughese, K.T. (2003). Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites. **Compos. Sci. and Technol.** 64:955-965.

79. Choudhury, A. (2008). Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. **Mater. Sci. Eng., A.** 491:492-500.
80. Kongparikul, S., Prasassarakich, P., and Rempel, G.L. (2008). Catalytic hydrogenation of methyl methacrylate-g-natural rubber (MMA-g-NR) in the presence of  $\text{OsHCl}(\text{CO})(\text{O}_2)(\text{PCy}_3)_2$ . **Appl. Catal., A.** 344: 88-97.
81. Espinosa, M.H., del-Toro, P.J.O., and Silva, D.Z. (2001). Microstructural analysis of poly(glycidyl methacrylate) by  $^1\text{H}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. **Polymer.** 42: 3393-3397.
82. Arayapranee, W., Prasassarakich P. and Rempel, G.L. (2003). Process variables and their effects on grafting reactions of styrene and methyl methacrylate onto natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 89: 63-74.
83. Kim, T. H. and Lee, N. (2003). Melt-grafting of maleimides having hindered phenol group onto polypropylene. **Korean Chem. Soc.** 24: 1809-1813.
84. Jiang, D.D. and Wilkie, C.A. (1998). Graft copolymerization of methacrylic acid, acrylic acid and methyl acrylate onto styrene-butadiene block copolymer. **Eur. Polym. J.** 34:997-1006.
85. Hourston, D.J. and Romaine, J. (1991). Modification of natural rubber latex. III. Natural rubber-polystyrene composite latexes synthesized using azo-bis-isobutyronitrile as initiator. **J. Appl. Polym. Sci.** 43: 2207-2211.

## ประวัติผู้วิจัย

### 1. หัวหน้าโครงการ

- ชื่อ** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราณี ชุมสำโรง
- ประวัติ** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปราณี ชุมสำโรง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปริญญาโทและเอก สาขา Polymer Science and Technology จาก University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) ประเทศสหราชอาณาจักร มีความชำนาญในสาขา Emulsion Polymerization และ Polymer blends and Composites

### ผลงานทางวิชาการ

- P. Chumsamrong and J. Kluengsamrong (2004) Banana fibres: Extraction and Potential Use as Reinforcement for Polypropylene. *The Third Thailand Materials Science and Technology Conference*, Bangkok, Thailand, 391.
- P. Chumsamrong (2004). Polymeric Materials by Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP). *Suranaree J. Sci. Technol.* 11(3):166-178.
- ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, กษมา จารุกัจจ, จันทิมา ดีประเสริฐกุล, นิธินาถ สุภกาญจน์, ปราณี ชุมสำโรง, วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ (2547) เส้นใยธรรมชาติ...ทางเลือกใหม่สำหรับโพลีเมอร์เชิงประกอบ, *วิศวกรรมสาร*, 57 (683), 44.
- W. Sutapan, J. Kluengsamrong, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukamjorn, N. Supakarn and P. Chumsamrong (2004). Studies of Thermal Properties and Surface Characteristic of Pretreated Jute Fibers by Boiling and Soxhlet Extraction. *30<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand*, Bangkok, Thailand, 175.
- P. Chumsamrong, S. Wongkrazo and O. Monprasith (2005). Poly(butyl acrylate) Grafted Natural Rubber Latex: Preparation and Film Formation, *31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand*, Nakorn Ratchasima, Thailand, 242.
- P. Chumsamrong, W. Sutapan, S. Kiaw-on and W. Tonukoon (2005). Influence of Alkali Treated Rossells Fibers on The Tensile Properties of Unsaturated Polyester Resin. *31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand*, Nakorn Ratchasima, Thailand, 234.
- P. Chumsamrong and O. Monprasith (2007). Preparation, Adhesive Performance and Stability of Natural Rubber Latex grafted with n-butyl acrylate (BA) and methyl methacrylate (MMA). *Suranaree J. Sci. Technol.* 14(3):269-276.



- P. Chumsamrong and J. Mondobyai (2008). Preparation, Adhesive Performance and Stability of Natural Rubber Latex grafted with n-butyl acrylate (BA) and methyl methacrylate (MMA). *Adv. Mater. Res.* 47-50:1149-1152.
- N. Prasoetsopha, P. Chumsamrong and N. Suppakarn (2009). Studies of Natural Rubber-Modified Epoxy Resin. *Pure and Applied Chemistry International Conference*, Phitsanulok, Thailand, 254.
- N. Prasoetsopha, P. Chumsamrong and N. Suppakarn (2009). Effects of type and concentration of initiator on grafting of acrylic monomers onto depolymerized natural rubber. *International Conference on Advance in Materials and Processing Technologies (AMPT 2009)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 70.
- N. Prasoetsopha, P. Chumsamrong and N. Suppakarn (2009). Physical Properties of Modified Natural Rubber/Epoxy Resin Blends. *11<sup>th</sup> Pacific Polymer Conference 2009 (PPC11)*, Cairns, Australia, P388.
- S. Srisuwan and P. Chumsamrong (2010). Effects of Fiber orientation and fiber content on physical properties of sisal fiber/epoxy composites. *Pure and Applied Chemistry International Conference*, Ubon Ratchathani, Thailand, 464.
- P. Juntuek, C. Ruksakulpiwat, P. Chumsamrong and Y. Ruksakulpiwat (2010). The study of using glycidyl methacrylate grafted natural rubber as an impact modifier of polylactic acid. *The TechConnect World Conference and Expo 2010*, Anaheim, California, USA.
- S. Srisuwan and P. Chumsamrong (2010). Effects of Weave Type and Fiber Content on Physical Properties of Sisal Fiber/Epoxy Composites *Adv. Mater. Res.* 123-125:1139-1142.
- S. Songprateepkul and P. Chumsamrong (2010). Studies of Natural Rubber Grafted with Acrylic monomers *Adv. Mater. Res.* 123-125:1263-1266.
- P. Juntuek, C. Ruksakulpiwat, P. Chumsamrong and Y. Ruksakulpiwat (2010). Mechanical Properties of Polylactic acid and Natural rubber blends using Vetiver grass fiber as Filler. *Adv. Mater. Res.* 123-125:1167-1170.
- N. Prasoetsopha, P. Chumsamrong and N. Suppakarn (2011). Effects of type and concentration of initiator on grafting of acrylic monomers onto depolymerized natural rubber. *Adv. Mater. Res.* 264-265:565-570.
- P. Juntuek, C. Ruksakulpiwat, P. Chumsamrong, Y. Ruksakulpiwat, "Effect of vetiver grass on biodegradability of polylactic acid and natural rubber blends, *the 3<sup>rd</sup> International Conference on Biodegradable and biobased polymer (BIOPOL2011)*, August 29- 31, 2011, Strasbourg, FRANCE. PO-159.
- P. Juntuek, C. Ruksakulpiwat, P. Chumsamrong, Y. Ruksakulpiwat, "Mechanical properties of polylactic acid and natural rubber blend using calcium carbonate and vetiver grass fiber as filler" *the 18<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM18)*, August 21-26, 2011, Jeju, Korea. P.2-24.
- P. Juntuek, C. Ruksakulpiwat, P. Chumsamrong and Y. Ruksakulpiwat (2011). Glycidyl methacrylate grafted natural rubber: Synthesis, characterization, and mechanical property. *J. Appl. Polym. Sci.* 122(5):3152-3159.

## 2. ผู้ร่วมวิจัย 1

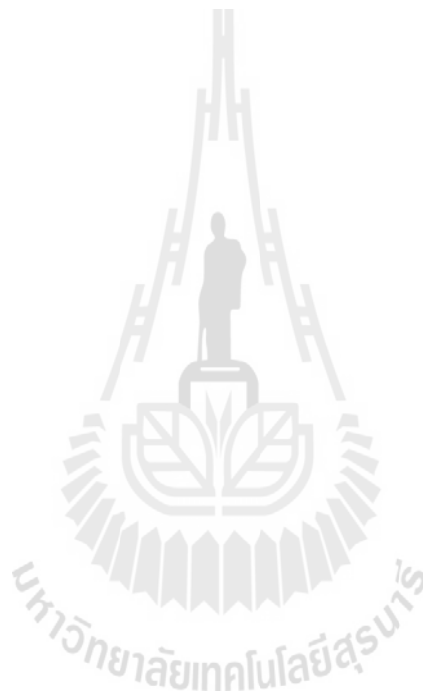
**ชื่อ** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ ศุภกาญจน์

**ประวัติ** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิธินาถ ศุภกาญจน์ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษาปริญญาตรีจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริญญาโท จาก วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปริญญาเอกสาขา Macromolecular Science จากมหาวิทยาลัย Case Western Reserve ประเทศสหรัฐอเมริกา มีความชำนาญในสาขา Polymer Characterization และ Polymer Composites

### ผลงานวิจัยที่มีการเผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ ระหว่างปี 2001-2011

- S. Rakmae, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun and N. Suppakarn, "Effect of mixing technique and filler content on physical properties of bovine bone based HA/PLA composites" **J Appl Polym Sci**, **122**(4), 2433-2441, 2011.
- S. Rakmae, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun and N. Suppakarn, "Physical properties and cytotoxicity of surface-modified bovine bone-based hydroxyapatite/poly(lactic acid) composites" **J Comp Mater**, **45**(12), 1259-1269, 2011.
- N. Suppakarn, K. Jarukumjorn, "Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: Effect of flame retardant type and content," **Composites Part B**, **40** (7), 613-618, 2009.
- Y. Ruksakulpiwat, J. Sridee, N. Suppakarn, W. Sutapun, "Improvement of impact property of natural fiber-polypropylene composite by using natural rubber and EPDM rubber," **Composites Part B**, **40** (7), 619-622, 2009.
- K. Jarukumjorn, N. Suppakarn, "Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber-polypropylene composites," **Composites Part B**, **40** (7), 623-627, 2009.
- U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, "Shear-induced crystallization of injection molded vetiver grass-polypropylene composites," **J. Appl. Polym. Sci.**, **113**, 4003-4014, 2009.
- S. Rimdusit, N. Kampangsaeree, W. Tanthapanichakoon, T. Takeichi, and N. Suppakarn, "Development of Wood-Substituted Composites from Highly Filled Polybenzoxazine-Phenolic Novolac Alloys," **Polym. Eng. Sci.**, **47**, 140-149, 2007.

- U. Somnuk, G. Eder, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, W. Sutapun, and Y. Ruksakulpiwat, "Quiescent Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites", **J. Appl. Polym. Sci.**, **106**, 2997-3006, 2007.
- Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, W. Thomthong, "Vetiver - Polypropylene Composites: Physical and Mechanical Properties," **Composites Part A**, **38**, 590-601, 2007.
- N. Suppakarn, H. Ishida, and J.D. Cawley, "Roles of Poly(propylene glycol) During Solvent-based Lamination of Ceramic Green Tape," **J. Am. Ceram. Soc.**, **84**(2), 289-296, 2001.



เอกสารการตีพิมพ์ผลงานวิจัย



- 
- 1 งามทิพย์ ภู่วโรดม. KU-GREEN: ภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากมันสำปะหลัง: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน, 2002: Available from: [http://ku.ac.th/research\\_good1.html](http://ku.ac.th/research_good1.html)
  - 2 A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Rrzal, *Natural fibers, Biopolymers and Biocomposites*, Taylor&Francis, Boca Raton, 2005.
  - 3 A.F.S. Budiman, *Natuur rubber newsletter*, **28**, 4<sup>th</sup> quarter, 2002.
  - 4 I. Zainol, I. A. Mohamad, A. Z. Fadzil, A. Ramli, F.A.M. Haslan and A.A. Azizan, *Mater. Sci. Forum*, **517**, 272, 2006.
  - 5 A.P. Mathew and S. Thomas, *Mater. Lett.*, **50**, 154, 2001.
  - 6 H-J Jin, I-J Chin, M-N Kim, S-H Kim and J-S Yoon, *Eur. Polym. J.*, **36**, 165, 2000.
  - 7 R.J. Philpot, D.K. Buckmiller, E.R. Welsh and D.W. Erickson, inventor; Advanced Composites, Inc., assignee. March 5, 2002 *US Patent no. 6,352,485*.
  - 8 T. Shino, inventor; SRI Sports Limited, assignee. November 7, 2006 *US Patent no. 7,131,920*.
  - 9 Y. Li, Y. –W. Mai, and L. Ye, *Compos. Sci. Technol.*, **60**, 2037, 2000.
  - 10 S. K. Garkhai, R. W. H. Heijenrath, and T. Peijs, *Appl. Compos. Mater.*, **7**, 351, 2000.
  - 11 J. C. M. De Bruijn, *Appl. Compos. Mater.*, **7**, 415, 2000.
  - 12 A. R. Sanadi and D. F. Caulfied, *Compos. Interf.*, **7**, 31, 2000.
  - 13 D. S. Varma, M. Varma, and I. K. Varma, *Text. Res. J.*, **54**, 827, 1984.
  - 14 Joseph, S. Thomas, and C. Pavithran, *Polymer*, **37**, 5139, 1996.
  - 15 Arends, C.B.(1996). **Polymer toughening**. New York: Marcel Dekker.
  - 16 Saadati, P., Baharvand, H., Rahimi, A., and Morshedian, J. (2005). Effect of modified liquid rubber on increasing toughness of epoxy resins. **Iran. Polym. J.** 14: 637-646.
  - 17 Ramos, V.D., Costa, H.M.D., Soares, V.L.P., and Nascimento, R.S.V. (2005). Modification of epoxy resin: a comparison of different types of elastomer. **Polym. Test.** 24: 387-394.
  - 18 Jin, F.L. and Park, S.J. (2007). Improvement in fracture behaviors of epoxy resins toughened with sulfonated poly(ether sulfone). **Polym. Degrad. Stab.** 92: 509-514.
  - 19 Zhi-hua, L., Yao-peng, H., Dong-yan, R., and Zi-qiao, Z. (2008). Structural characteristics and properties of polyurethane modified TDE-85/MeTHPA epoxy resin with interpenetrating polymer networks. **J. Cent. South Univ. Technol.** 15: 305-308.

- 
- 20 Zhou, Y.X., Wu, P.X., Cheng, Z.Y., Ingram, J., and Jeelani, S. (2008). Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube. **eXPRESS Polym. Lett.** 2: 40-48.
- 21 Chikhi, N., Fellahi, S., and Bakar, M. (2002). Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber. **Eur. Polym. J.** 38: 251-264.
- 22 Huang, Y. and Kinloch, A.J. (1992). The toughness of epoxy polymer containing microvoids. **Polymer.** 33: 1330-1332.
- 23 Ismail, Z., Ahmad, M.I., Zakaria, F.A., Anita, R., Marzuki, H.F.A., and Aziz, A.B., (2006). Modification of epoxy resin using liquid natural rubber. **J. Mater. Sci.** 517: 272-274.
- 24 Rubber Research Institute of Thailand. (2007). [Online]. Available: <http://www.rubberthai.com/information/information.htm>
- 25 Charmondusit, K., Kiatkamjornwong, S., and Prasassarakich, P. (1998). Grafting of methyl methacrylate and styrene onto natural rubber. **J. Sci. Chula. Univ.** 23: 167-181.
- 26 Chuayjuljit, S., Soatthiyanon, N., and Potiyaraj, P. (2006). Polymer blends of epoxy resin and epoxidized natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 102: 456-459.
- 27 Kumar, K.D. and Kothandaraman, B. (2008). Modification of (DGEBA) epoxy resin with maleated depolymerised natural rubber. **eXPRESS Polym. Lett.** 2: 302-311.
- 28 Nor, H.M. and Ebdon, J.R. (2000). Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution part 1. A study by GPC and FTIR spectroscopy. **Polymer.** 41: 2359-2365.
- 29 Suksawad, P. and Sakdapipanich, J. (2005) Preparation of telechelic low molecular-weight natural rubber latex by photo chemical degradation using TiO<sub>2</sub> film as a photocatalyst. **31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand.** Suranaree University of Technology.
- 30 Tanaka, Y., Sakaki, T., Kawasaki, A., Hayashi, M., Kanamaru, K., and Shibata, K. (1999). **US Pat.** 5,856,600.
- 31 Nakason, C., Kaesaman, A., and Supasanthitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. **Polym. Test.** 23: 35-41.
- 32 Irfan, M.H. (1998). **Chemistry and technology of thermosetting polymers in construction applications.** Boston: Kluwer academic publishers.
- 33 Goodman, S.H. (1998). **Handbook of Thermoset Plastics.** (2<sup>nd</sup> ed.). California: Noyes Publications.

- 
- 34 Chiraphaphisarn N. (1997). **A study of the properties of liquid rubber filled epoxy resin.** M.S.thesis, Mahidol University, Thailand.
- 35 Mark, H.F. (2003). **Encyclopedia of polymer science and technology.** (3<sup>th</sup> ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, 9: 730-739.
- 36 Lee, H. and Neville, K. (1982). **Handbook of epoxy resins.** New York: McGraw-Hill, Inc.
- 37 Bhowmick, A.K. and Stephens, H.L. (2001). **Handbook of elastomers.** (2<sup>nd</sup> ed.). New York: Marcel Dekker.
- 38 Nakason, C., Kaesaman, A., and Yimwan, N. (2003). Preparation of graft copolymers from deproteinized and high ammonia concentrated natural rubber latices with methyl methacrylate. **J. Appl. Polym. Sci.** 87: 68-75.
- 39 Suriyachi, P., Kiatkamjornwong, S. and Prasassarakich, P. (2004). Natural rubber-g-glycidyl methacrylate/styrene as a compatibilizer in natural rubber/PMMA blends. **Rubber Chem. and Technol.** 77: 914-930.
- 40 Thongpin, C., Wongtimnoi, K., Kamolsawat, J., and Rotkasem, P. (2006). Feasibility study of binder synthesis from natural rubber for use in making running tracks in Thailand. **The 32<sup>nd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT 2006).** Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand.
- 41 Siri-Upathum, C. and Boonyawat, J. (2007). Preparation of low allergenic protein concentrated natural rubber latex using suitable low molecular weight cellulose derivatives induced by gamma irradiation. **10<sup>th</sup> Conference on Nuclear Science and Technology.** Bangkok International Trade and Exhibition Centre (BITEC) Bangkok, Thailand.
- 42 Okwu, U.N. and Akinlabi, A.K. (2007). Production of low-molecular-weight natural rubber: comparative assessment of a nonchemical route. **J. Appl. Polym. Sci.** 106: 1291-1293.
- 43 Phinyocheep, P. and Duangthong, S. (2000). Ultraviolet-curable liquid natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 78: 1478-1485.
- 44 Isa, S.Z., Yahya, R., Hassan, A., and Tahir, M. (2007). The influence of temperature and reaction time in the degradation of natural rubber latex. **Malaysian J. Anal. Sci.** 11: 42-47.
- 45 Halasa, A.F., Massie, J.M., and Ceresa, R.J. (2005). **The science and technology of rubber.** (3<sup>th</sup> ed.). In: Mark, J.E., Berman, B. and Eirich, F.R., editor. Elsevier Inc. pp. 497.

- 
- 46 Nghia, P.T., Onoe, H., Yamamoto, Y., and Kawahara, S. (2008) Hydrogenation of natural rubber having epoxy group. **Colloid Polym. Sci.** 286: 993-998.
- 47 Lehrle, R.S. and Willist, S.L. (1997). Modification of natural rubber: a study to assess the effect of vinyl acetate on the efficiency of grafting methyl methacrylate on rubber in latex form, in the presence of azo-bis-isobutyronitrile. **Polymer.** 38: 5937-5946.
- 48 Oliveira, P.C., Guimaraes, A., Cavaillé, J., Chazeau, L., Gilbert, R.G., and Santos, A.M. (2005). Poly(dimethylaminoethyl methacrylated) grafted natural rubber from seeded emulsion polymerization. **Polymer.** 46:1105-1111.
- 49 George, V., Britton, I.J. and Sebastian, M.S. (2003). Studies on radiation grafting of methyl methacrylate onto natural rubber for improving modulus of latex film. **Radiat. Phys. Chem.** 66: 367-372.
- 50 Derouet, D., Intharapat, P., Tran, O.N., Gohier, F. and Nakason, C. (2009). Graft copolymers of natural rubber and poly(dimethyl(acryloyloxymethyl) phosphonate) (NR-g-PDMAMP) or poly(dimethyl(methacryloyloxyethyl) phosphonate) (NR-g-PDMMEP) from photopolymerization in latex medium. **Eur. Polym. J.** 45: 820-836.
- 51 Collyer, A.A. (1994). **Rubber toughened engineering plastics**. London: Chapman & Hall.
- 52 Ratna, D. (2001). Phase separation in liquid rubber modified epoxy mixture. Relationship between curing conditions, morphology and ultimate behavior. **Polymer.** 42: 4209-4218.
- 53 Kong, J., Ning, R., and Tang, Y. (2006). Study on modification of epoxy resins with acrylate liquid rubber containing pendant epoxy groups. **J. Mater. Sci.** 41:1639-1641.
- 54 Rutnakornpituk, M. (2005). Modification of epoxy-novolac resins with polysiloxane containing nitrile functional groups: synthesis and characterization. **Eur. Polym. J.** 41: 1043-1052.
- 55 SpecialChem Innovation & Solutions. (2008). Impact Modifiers Center [On-line]. Available: [http://www.specialchem4polymers.com/tc/Acrylic-impact Modifiers/index.aspx?id=2905](http://www.specialchem4polymers.com/tc/Acrylic-impact%20Modifiers/index.aspx?id=2905)
- 56 Barcia, F.L., Amaral, T.P., and Soare, B.G. (2003). Synthesis and properties of epoxy resin modified with epoxy-terminated liquid polybutadiene. **Polymer.** 44: 5811-5819.
- 57 Pearson, R.A. and Yee, A.F. (1991). Influence of particle size and particle-size distribution on toughening mechanisms in rubber-modified epoxies. **J. Mater. Sci.** 26: 3828-3844.
- 58 Ratna, D. and Banthia, A.K. (2007). Reactive acrylic liquid rubber with terminal and pendant carboxyl groups as a modifier for epoxy resin. **Polym. Eng. Sci.** 47: 26-33.



- 
- 59 Bagheri, R. and Pearson, R.A. (1996). Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: I. Microvoid toughening. **Polymer**. 37: 4529-4538.
- 60 Bagheri, R. and Pearson, R.A. (2000). Role of particle cavitation in rubber-toughened epoxies: II. Inter-particle distance. **Polymer**. 41: 269-276.
- 61 Ratna, D., Banthia, A.K., and Deb, P.C. (2000). Toughening of epoxy resin using acrylate-based liquid rubbers. **J. Appl. Polym. Sci.** 78: 716-723.
- 62 Thomas, R., Yumei, D., Yuelong, H., Le, Y., Moldenaers, P., Weimin, Y., Czigany, T., and Tomas, S. (2008). Miscibility, morphology, thermal, and mechanical properties of a DGEBA based epoxy resin toughened with a liquid rubber. **Polymer**. 49: 278-294.
- 63 คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาไรฟิชนา. บทปฏิบัติการที่ 23 ป่านสรนารายณ์ (sisal).(online). Available URL: <http://agri.kps.ku.ac.th/agron/lesson23.shtml>.
- 64 R. P. Kumar, K. C. Manikanda Nair, S. Thomas, S.C. Schit and K. Ramaburthy, (2000). Morphology and melt rheological behaviour of short-sisal-fibre-reinforced SBR composite. *Compos. Sci. and Technol.* **60**;1737-1751
- 65 A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Drzal (2002). Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green materials World. *J. Polym. Environ.* **10**:19-26.
- 66, A. K. Bledzki and J. Gassan (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Prog. Polym. Sci.* **24**: 221–274.
67. P. S. Murherjee and K. G Satyanarayana. (1984). Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1. Sisal fibre. *J. Mater. Sci.* **19**:3925-3934.
- 68 Y. Li, C. Hu and Y. Yu (2008). Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Composites: Parts A*, **39**; 570-578.
- 69 C.P.L. Chow, X.S. Xing and R.K.Y. Li (2007) Moisture absorption studies of sisal fiber reinforced polypropylene composites. *Compos. Sci. Technol.* **67**:306-313
- 70 A.S. Luyt and M.E. Malunka (2005). Composites of low density polyethylene and short sisal fibers: the effect of wax addition and peroxide treatment on thermal properties. *Thermochim Acta.* **426**:101-107.
- 71 K. Joseph, S. Varghese, G. Kalaprasad, S. Thomas, L. Prasannakumari, P. Koshy and C. Pavithran (1996). Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fiber reinforced polymer composites. *Eur. Polym. J.* **32**:1243-1250.

- 
- 72 E.T.N. Bisanda (2000). The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibers. *Appl. Compos. Mater.* **7**:331-339.
- 73 J.D. Megiatto Jr., C.G. Silva, D.S. Rosa and E. Frollini (2008). Sisal Chemically modified with lignins: Correlation between fibers and phenolic composites properties. *Polym. Degrad. Stab.* **93**:1109-1121.
- 74 V.A. Alvarez and A. Vazquez (2006). Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites. *Composites Part A.* **37**:1672-1680.
- 75 T. Pongprayoon, N. Yanumet and S. Sangthong (2008). Surface behavior and film formation analysis of sisal fiber coated by poly(methyl methacrylate) ultrathin film. *Colloids Surf., A.* **320**:130-137
- 76 M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Y. L., G. C. Yang and H. M. Zeng. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Compos. Sci. and Technol.* **61**:1437-1447
- 77P. Antich, A. Vazquez, I. Mondragon and C. Bernal (2006). Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers. *Composite : Part A* **37**:139-150
- 78 M. Jacob, S. Thomas and K.T. Varughese (2003). Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites. *Compos. Sci. and Technol.* **64**:955-965.
- 79 A. Choudhury (2008). Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. *Mater. Sci. Eng., A.* **491**:492-500.
- 80 Kongparpkul, S., Prasassarakich, P., and Rempel, G.L. (2008). Catalytic hydrogenation of methyl methacrylate-g-natural rubber (MMA-g-NR) in the presence of OsHCl(CO)(O<sub>2</sub>)(PCy<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. *Appl. Catal., A.* **344**: 88-97.
- 81 Espinosa, M.H., del-Toro, P.J.O., and Silva, D.Z. (2001). Microstructural analysis of poly(glycidyl methacrylate) by <sup>1</sup>H and <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. *Polymer.* **42**: 3393-3397.
- 82 Arayaprane, W., Prasassarakich P. and Rempel, G.L. (2003). Process variables and their effects on grafting reactions of styrene and methyl methacrylate onto natural rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* **89**: 63-74.
- 83 Kim, T. H. and Lee, N. (2003). Melt-grafting of maleimides having hindered phenol group onto polypropylene. *Korean Chem. Soc.* **24**: 1809-1813.

- 
- 84 Jiang, D.D. and Wilkie, C.A. (1998). Graft copolymerization of methacrylic acid, acrylic acid and methyl acrylate onto styrene-butadiene block copolymer. **Eur. Polym. J.** 34:997-1006.
- 85 Hourston, D.J. and Romaine, J. (1991). Modification of natural rubber latex. III. Natural rubber-polystyrene composite latexes synthesized using azo-bis-isobutyronitrile as initiator. **J. Appl. Polym. Sci.** 43: 2207-2211.

