



อิทธิพลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติเชิงกลในนาโนคอมโพสิทอิพ็อกซีเรซินผสม  
ยางธรรมชาติอิพอกไซด์สำหรับประยุกต์ใช้ใบพัดโดรน  
Influence of Nanosilica on Mechanical Property of Epoxy Resin and  
Epoxide Natural Rubber Nanocomposite for Drone application

อัญนุดา หลั่นหน๊ะ  
Aunnuda Lanna

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียาง  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Rubber Technology  
Prince of Songkla University  
2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา สุขชาติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....

(ดร.อัจฉริยะ โชติพันธ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณรัตน์ เชื่องชยะพันธุ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ .....

(นางสาวอัญญา หลั่นหนะ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นางสาวอัญญา หลันหะ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติเชิงกลในนาโนคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์สำหรับประยุกต์ใช้ไบพัตโดรน
ผู้เขียน	นางสาวอัญญา หลั่นหั้นะ
สาขาวิชา	เทคโนโลยียาง
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมนาโนคอมโพสิตจากอีพ็อกซีเรซินผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydized natural rubber, ENR) และสารตัวเติมขนาดนาโน เพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกในอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิตโดยการเติมยาง ENR แล้วทำการศึกษาชนิดและปริมาณของยาง ENR (ENR 25, ENR 50) ในสัดส่วน 0, 3, 5, 7 และ 10 phr (part per hundred of epoxy resin) ที่เหมาะสมที่เติมลงไป ในอีพ็อกซีเรซินและเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารตัวเติมสองชนิด (นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส) แล้วทำการศึกษาปริมาณนาโนฟิลเลอร์ที่อัตราส่วน 0-5 phr ต่อสมบัติเชิงกล (ความต้านทานต่อแรงกระแทก, ความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็ง) สมบัติทางความร้อน ความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิต พบว่าการใช้ยาง ENR 50 สัดส่วน 5 phr ให้คอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินที่มีสมบัติที่ดีตามต้องการ ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งของคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การศึกษาชนิดของสารตัวเติม พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตัวเติมทั้งสองชนิด ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกและสมบัติทางความร้อนแก่นาโนคอมโพสิต นอกจากนี้หลังจากทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน พบว่าความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทำให้ได้ข้อสรุปว่านาโนคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินที่เตรียมจากยาง ENR 50 ปริมาณ 5 phr และนาโนซิลิกา 3 phr มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในไบพัตโดรน เนื่องจากช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงสุดถึง 15.85 kJ/m<sup>2</sup> (126 เปอร์เซ็นต์) และสามารถนำสูตรที่ปรับปรุงขึ้นรูปด้วยเทคนิคแบบใช้มือทา (hand lay-up) ร่วมกับคาร์บอนไฟเบอร์ ทำให้ได้วัสดุนาโนคอมโพสิตไบพัตโดรนที่สามารถงานได้จริง

**คำสำคัญ :** นาโนคอมโพสิต ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ นาโนซิลิกา นาโนเซลลูโลส และไบพัตโดรน

**Thesis Title** Influence of nanosilica on mechanical properties of epoxy resin and epoxide natural rubber nanocomposite for drone application

**Author** Miss Aunnuda Lanna

**Major Program** Rubber Technology

**Academic Year** 2018

### ABSTRACT

Green nanocomposites of epoxidized natural rubber/epoxy resin/nanoparticles were prepared and characterized to improved impact strength by added epoxidized natural rubber (ENR). To study the type and amount of rubber ENR (ENR 25, ENR 50) in the proportion of 0, 3, 5, 7 and 10 phe (part per hundred of epoxy resin) which are suitable for adding in epoxy resin and improved hardness and mechanical properties of composite by added nanoparticle (nanosilica and nanocellulose). The nanoparticle fillers tested were nanocellulose and nanosilica. Effects of filler loading on mechanical properties and thermal properties were assessed. The nanoparticles were easily dispersed with minimal aggregation for loadings up to 5 phe according to scanning electron microscopy (SEM). The nanocomposites were investigated by thermal gravimetric analysis (TGA), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and mechanical testing of impact strength and tensile strength. The results showed that mechanical properties such as impact strength of nanocomposites can be improved by blending in ENR 50 of 5 phe mixed with nanosilica of 3 phe, relative to the baseline green nanocomposite mix. Effects of accelerated aging in UV conditions were evaluated. Accelerated aging improved tensile strength while the other mechanical properties did not change significantly. These nanocomposites are expected to have high wear rates limiting their service life.

**Keywords:** nanocomposites, epoxidized natural rubber, nanosilica, nanocellulose, UAV

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำจากบุคคลหลายท่าน ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา สุขชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ขอขอบพระคุณที่เสียสละเวลาในการเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คอยให้การสนับสนุนชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน และแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาในงานวิจัยเสมอมา รวมทั้งขอขอบพระคุณ ดร.อัฉริยะ โชติจันทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัตน์ เชื้องชยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมรวมถึงคณะกรรมการคุมสอบทุกท่านได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชิด สระโมฬี และดร.เอกสิษฐ์ อนันต์เจริญวงศ์ ที่คอยตรวจสอบความเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอนข้าพเจ้ามาจนถึงปัจจุบัน รวมถึงขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรรัตน์ และน้องๆ นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนและเอื้อเพื่อการใช้โปรแกรม Ansys ในการสร้างแบบจำลองการทำงานของใบพัดโดรน ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ที่มอบทุนผู้ช่วยวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ). ระดับปริญญาโท ประจำปี 2560 ที่สนับสนุนทุนค่าธรรมการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษาที่เน้นการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) ผู้ร่วมให้ทุนผู้ช่วยวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม รวมถึงสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คือ น้ำยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 25, ENR 50)

ขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาเทคโนโลยีทุกท่าน ที่คอยให้การสนับสนุน อำนวยสถานที่ในการปฏิบัติงาน รวมถึงขอบคุณพี่ๆ ปริญญาเอกและเพื่อนๆ น้องๆ ปริญญาโททุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้เสมอมา ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ทำให้ปริญญาฉบับนี้เสร็จสิ้น ผู้เขียนขอขอบคุณเจ้าของผลงานทุกท่าน ที่ได้นำมาอ้างอิงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาแก่ผู้เขียนมาตั้งแต่เยาว์ ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง และคอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าอย่างดีที่สุดและเป็นกำลังใจผู้เขียนมาโดยตลอด

อัญนุตา หลั่นหน๊ะ

## สารบัญ

บทคัดย่อ.....	(5)
ABSTRACT.....	(6)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(12)
รายการภาพประกอบ.....	(13)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(17)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 อากาศยานไร้คนขับ.....	5
2.2 วัสดุคอมโพสิต.....	6
2.3 วัสดุนาโนคอมโพสิต.....	7
2.4 อีพ็อกซีเรซิน.....	8
2.5 พอลิเมอร์ผสม.....	13
2.6 คอมโพสิตยาง.....	14
2.7 นาโนเทคโนโลยีของยาง.....	14
2.8 สารนาโนคอมโพสิตที่ใช้กับอีพ็อกซีเรซิน.....	15
2.9 วัสดุคอมโพสิตที่มีการใช้ในการทำใบพัด.....	15
2.10 การใช้ยางในการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน.....	16
2.11 ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	17
2.12 นาโนซิลิกา.....	19
2.13 นาโนเซลลูโลส.....	19
2.14 คาร์บอนไฟเบอร์.....	22
2.15 เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิต.....	23



2.15.1 Hand lay-up.....	23
2.15.2 Spray-up.....	24
2.15.3 Filament winding.....	24
2.15.4 Resin transfer molding.....	25
2.15.5 Inflation.....	26
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
2.16.1 สารนาโนคอมโพสิตที่ใช้กับอีพ็อกซีเรซิน.....	26
2.16.2 พอลิเมอร์ที่มีการใช้ทำไบพัด.....	27
2.16.3 การใช้ยางปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน.....	28
2.16.4 การใช้นาโนซิลิกาปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติ.....	29
2.16.5 การใช้นาโนเซลลูโลสปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์.....	33
3.1.1 สารเคมีและวัสดุ.....	33
3.1.2 อุปกรณ์.....	34
3.2 ศึกษาสมบัติเบื้องต้น.....	34
3.2.1 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	34
3.2.2 วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ.....	35
3.3 ศึกษาสภาวะการผสมคอมโพสิตยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์กับอีพ็อกซีเรซิน.....	35
3.4 ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขนาดนาโน.....	37
3.5 ศึกษาอิทธิพลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติของนาโนคอมโพสิต.....	37
3.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	38
3.6.1 ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง.....	38
3.6.2 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด.....	38
3.6.3 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก.....	39
3.6.4 ทดสอบสมบัติความแข็ง.....	39
3.6.5 ทดสอบความหนาแน่น.....	39
3.7 ทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	39

3.8	ศึกษาความเข้ากันได้ของคอมโพลีท.....	40
3.9	ศึกษาความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน.....	41
3.10	ศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปและทดสอบการใช้งาน.....	42
3.10.1	ออกแบบโมลไบพัตโดรน.....	42
3.10.2	การขึ้นรูปไบพัตโดรน.....	43
3.10.3	ทดสอบสมบัติของคอมโพลีทไฟเบอร์.....	43
3.10.4	การสร้างการจำลองการทำงานของไบพัตในโปรแกรม Ansys.....	44
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	46
Part I:	ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	46
4.1	การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	46
4.1.1	ลักษณะเฉพาะ.....	46
4.1.2	โครงสร้างทางเคมี.....	47
4.1.3	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	49
4.1.4	ปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ .....	50
4.1.5	โครงสร้างทางเคมีของนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส.....	52
4.2	วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ.....	54
Part II:	คอมโพลีทอีพ็อกซีเรซิน.....	57
4.1	ศึกษาเวลาและลักษณะการคงรูป.....	57
4.1.1	อัตราส่วนของอีพ็อกซีเรซินและสารคงรูป.....	57
4.1.2	ศึกษาเวลาที่ใช้ในการคงรูป.....	59
4.2	ศึกษาสมบัติเชิงเคมีของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค FTIR.....	64
4.2.1	อัตราการเกิดของอีพ็อกซีเรซิน.....	64
4.2.2	อัตราการเกิดของยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์.....	66
4.2.3	อัตราการเกิดของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์.....	67
Part III:	คอมโพลีทอีพ็อกซีเรซินผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	68
4.1	ศึกษาชนิดและปริมาณของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	68
Part IV:	ปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินด้วยสารตัวเติม.....	73
4.1	ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส).....	73
Part V:	ปรับปรุงสมบัติของนาโนคอมโพลีทด้วยนาโนซิลิกา.....	81

4.1 ศึกษาอัตราส่วนของนาโนซิลิกาที่เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิต.....	81
Part VI: ศึกษาการขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ.....	95
4.1 ศึกษาการขึ้นรูปใบพัดโดรนด้วยเทคนิค Hand lay-up.....	95
4.2 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์.....	96
4.3 วิเคราะห์การจำลองการทำงานของใบพัดโดรน.....	105
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
เอกสารอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	151

## รายการตาราง

ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาคอมโพสิตยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	35
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานาโนคอมโพสิต.....	36
ตารางที่ 3.3	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานาโนคอมโพสิตระหว่าง EP/ENR 50 และนาโนซิลิกา.....	37
ตารางที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดิบ.....	46
ตารางที่ 4.2	ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	47
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	50
ตารางที่ 4.4	เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของนาโนเซลลูโลสและนาโนซิลิกา.....	53
ตารางที่ 4.5	ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ.....	56
ตารางที่ 4.6	อัตราส่วนของความเข้มข้นของอีพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR 50.....	58
	และฮาร์ดเดนเนอร์	
ตารางที่ 4.7	อัตราส่วนของความเข้มข้นของอีพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR 50.....	60
	และฮาร์ดเดนเนอร์ที่เวลาแตกต่างกัน	
ตารางที่ 4.8	เวลาการคงรูปของคอมโพสิตที่ปริมาณยาง ENR 25 และ ENR 50 ที่ต่างกัน.....	63
ตารางที่ 4.9	ลักษณะการคงรูปของคอมโพสิตของนาโนฟิลเลอร์ทั้งสองชนิด.....	63
ตารางที่ 4.10	แสดงอุณหภูมิการเสื่อมสลายของนาโนคอมโพสิต.....	79
ตารางที่ 4.11	สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและรูปแบบการผสมต่างกัน.....	83

## รายการภาพประกอบ

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของไดรอน.....	5
รูปที่ 2.2 วัสดุคอมโพสิตแบ่งออกตามชนิดของเมทริกซ์.....	6
รูปที่ 2.3 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงในคอมโพสิต.....	7
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดบิสฟีนอล-เอ-ไดโกลซิไดลอีเทอร์.....	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ bisphenol F.....	10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ hydantoin resins.....	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ Novolacs.....	10
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ Peracid resin.....	11
รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเทนเนอร์.....	11
รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาการคงรูปของอีพ็อกซีเรซิน.....	12
รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างทั่วไปของเอมีน.....	12
รูปที่ 2.12 ความแตกต่างระหว่างพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน.....	13
รูปที่ 2.13 โครงสร้างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติปรับสภาพโครงสร้าง (ENR).....	17
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช.....	20
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลสจากไม้.....	21
รูปที่ 2.16 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Hand-layup.....	23
รูปที่ 2.17 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Spray-up.....	24
รูปที่ 2.18 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Filament winding.....	24
รูปที่ 2.19 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Resin Transfer Molding.....	25
รูปที่ 2.20 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Infusion.....	26
รูปที่ 2.22 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิต (a) 5, (b) 10 และ (c) 25%wt.....	29
ของนาโนซิลิกา	
รูปที่ 2.23 แผนผังแสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซิลิกา.....	31
และพอลิเมอร์เมทริกซ์	
รูปที่ 3.1 การหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยโปรแกรม FTIR.....	40

รูปที่ 4.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	48
(c) นาโนเซลลูโลส และ (d) นาโนซิลิกา	
รูปที่ 4.2 ปฏิกริยาการเกิดยาง ENR ผ่านปฏิกิริยาเปอร์ฟอร์มิกซ์อีพ็อกไซด์.....	49
รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	50
รูปที่ 4.4 <sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (a) ENR 25 และ (b) ENR 50.....	51
รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของสารตัวเติม (a) นาโนซิลิกา (b) นาโนเซลลูโลส.....	52
รูปที่ 4.6 EDX spectra ของสารตัวเติม (a) นาโนเซลลูโลส และ (b) นาโนซิลิกา.....	54
รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	55
(c) นาโนเซลลูโลสและ (d) นาโนซิลิกา	
รูปที่ 4.8 ขนาดอนุภาคของ (a) นาโนเซลลูโลส และ (b) นาโนซิลิกา; (1) รูปภาพ 3D.....	56
,(2) phase 2D ของอนุภาค และ (3) phase separate ของอนุภาค	
รูปที่ 4.9 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์.....	57
รูปที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงกระทำของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50.....	58
รูปที่ 4.11 ความแข็งของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์.....	59
รูปที่ 4.12 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์.....	60
รูปที่ 4.13 เวลาในการไหลของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนอร์.....	61
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิขณะผสมของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนอร์.....	62
รูปที่ 4.15 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนอร์.....	65
รูปที่ 4.16 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนอร์.....	65
รูปที่ 4.17 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของยาง ENR 50 ผสมฮาร์ดเดนเนอร์.....	66
รูปที่ 4.18 FTIR สเปกตรัมของยาง ENR ผสมฮาร์ดเดนเนอร์.....	66
รูปที่ 4. 19 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์.....	67
รูปที่ 4.20 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์.....	68
รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะทางกายภาพของ (a) Epoxy resin (EP), (b) EP/ENR 25.....	68
และ (c) EP/ENR 50	
รูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงกระทำของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	69
รูปที่ 4.23 ความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	70
รูปที่ 4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	71
รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์.....	72

รูปที่ 4.26 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต (a) Epoxy resin pure; EP,.....	73
(b) EP/ENR 25 5 phe (c) EP/ENR 50 5 phe ปริมาณยาง ENR 50;	
(1) 0.25, (2) 0.5, (3) 0.75, และ (4) 1.00 phe	
รูปที่ 4.27 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิต.....	74
รูปที่ 4.28 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิต.....	75
รูปที่ 4.29 ความแข็งของนาโนคอมโพสิต.....	76
รูปที่ 4.30 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่เติม (a) นาโนซิลิกาและ.....	77
(b) นาโนเซลลูโลสเปรียบเทียบกับก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน	
รูปที่ 4.31 ความแข็งของนาโนคอมโพสิต (a) นาโนซิลิกา และ (b) นาโนเซลลูโลส.....	78
เปรียบเทียบกับก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน	
รูปที่ 4.32 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่เติม (a) นาโนเซลลูโลส.....	79
และ (b) นาโนซิลิกา ; (1) กราฟ TGA และ (2) กราฟ DTG	
รูปที่ 4.33 SEM micrograph ของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสแตกต่างกัน.....	80
(a) 0.25 , (b) 0.50, (c) 0.75 และ (d) 1.00 phe	
รูปที่ 4.34 SEM micrograph ของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสแตกต่างกัน.....	81
(a) 0.25, (b) 0.50, (c) 0.75 และ (d) 1.00 phe	
รูปที่ 4.35 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตที่แปรปริมาณนาโนซิลิกา.....	84
และแปรรูปแบบการผสม	
รูปที่ 4.36 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและ.....	85
รูปแบบการผสมที่ต่างกัน	
รูปที่ 4.37 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและ.....	86
รูปแบบการผสมที่ต่างกัน	
รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและรูปแบบการผสมที่ต่างกัน.....	87
รูปที่ 4.39 SEM micrograph ของนาโนคอมโพสิต (a) นาโนซิลิกา 1 phe.....	87
(b) นาโนซิลิกา 3 phe และ (c) นาโนซิลิกา 5 phe	
รูปที่ 4.40 การกระจายตัวของนาโนซิลิกาในนาโนคอมโพสิต (a) นาโนซิลิกา 1 phe,.....	88
(b) นาโนซิลิกา 3 phe และ (c) นาโนซิลิกา 5 phe	
รูปที่ 4.41 การสลายตัวความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน.....	89
รูปที่ 4.42 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe.....	91

รูปที่ 4.43 ความต้านทานต่อแรงกระทำของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe.....	91
รูปที่ 4.44 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe.....	92
รูปที่ 4.45 ความต้านทานต่อแรงกระทำของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe.....	93
รูปที่ 4.46 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe.....	94
รูปที่ 4.47 การสายตัวทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตก่อน-หลังทดสอบ.....	94
ความต้านทานต่อการใช้งาน	
รูปที่ 4.48 ลักษณะของใบพัดโพรนที่ขึ้นรูปได้.....	95
รูปที่ 4.49 ความต้านทานต่อแรงกระทำของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์.....	97
รูปที่ 4.50 ความต้านทานต่อการดัดงอของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์.....	98
รูปที่ 4.51 ค่าความแข็งของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์.....	99
รูปที่ 4.52 ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์.....	99
รูปที่ 4.53 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ (a) Epoxy resin (EP),.....	101
(b) EP+ENR 50+Nanosilica และ (c), (d) EP+ENR 50+Nanocellulose	
รูปที่ 4.54 ความต้านทานต่อแรงกระทำของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา.....	102
รูปที่ 4.55 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา.....	103
รูปที่ 4.56 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา.....	104
รูปที่ 4.57 ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา.....	104
รูปที่ 4.58 Contours ของ velocity ที่จุดกึ่งกลางใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm.....	105
รูปที่ 4.59 Contours เฉพาะใบพัดและปรับ Auto range ของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm...105	
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงความเร็วของใบพัดจากเงื่อนไขบินที่ความเร็ว 2000 rpm.....	106
รูปที่ 4.61 Contours ของความดันของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm.....	107
รูปที่ 4.62 Contours เฉพาะใบพัดและปรับ Auto range.....	107
รูปที่ 4.63 กราฟแสดงความดันของใบพัดจากเงื่อนไขบินที่ความเร็ว 2000 rpm.....	108
รูปที่ 4.64 แสดง stream line ของความเร็วของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm.....	108
รูปที่ 4.65 แสดง stream line ที่หน้าตัดแกน Z ของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm.....	109





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) หรือที่รู้จักกันในชื่อ โดรน (Drone) เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการบนเครื่อง แต่สามารถควบคุมได้ 2 ลักษณะ คือการควบคุมอัตโนมัติจากระยะไกล และการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบซับซ้อนติดตั้งไว้ในอากาศยาน ส่งผลให้โดรนมีรูปร่าง ขนาด และคุณสมบัติที่หลากหลายตามการใช้งาน [1] ปัจจุบันปริมาณการใช้โดรนในสหรัฐฯ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 5 ปีข้างหน้า สำนักงานบริหารการบินแห่งชาติสหรัฐฯ เปิดเผยว่าผลจากการสำรวจของกระทรวงการบิน (Federal Aviation Administration, FAA) กล่าวว่าการใช้งานโดรนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นประมาณสามเท่า จากประมาณ 1.1 ล้านคันในปี พ.ศ. 2016 เป็น 3.5 ล้านคนภายในปี พ.ศ. 2564 หน่วยงานยังประเมินว่าการทำงานในเชิงพาณิชย์จะเติบโตจาก 42,000 คันในปี พ.ศ. 2559 ถึงประมาณ 442,000 คันภายในปี พ.ศ. 2564 หน่วยงานด้านความปลอดภัยด้านการบินกล่าวว่าอาจมีผู้ใช้เครื่องบินด้านพาณิชย์จำนวนมากถึง 1.6 ล้านคนภายในปี พ.ศ. 2564 [2] ปริมาณการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ต่างๆ ได้รวดเร็วและแม่นยำ ทั้งการสำรวจ สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้าง ช่วยให้สามารถประเมินสถานการณ์ได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ โดยการควบคุมโดรน สามารถควบคุมด้วยรีโมทคอนโทรลโดยนักบินหรือควบคุมด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (Autopilot) และยังมีระบบควบคุมและติดตามการบินจากภาคพื้นดิน พร้อมทั้งรับสัญญาณภาพถ่ายในขณะที่ทำการสำรวจ เนื่องด้วยจุดเด่นของโดรนดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นข้อดีในการควบคุมจากระยะไกลหรือทำการสอดแนมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น การขนส่ง การเกษตร คุณลักษณะการจราจร ช่วยในภารกิจทางทหารที่ต้องเข้าไปในบริเวณที่มีความเสี่ยงสูง เพื่อทำการตรวจจับหรือค้นหาสิ่งที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ [3] ทำให้หน่วยงานต่างๆ ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญและความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้กับงานทั่วไป เช่น เป็นกล้องถ่ายภาพมุมสูงหรือถ่ายทำสารคดีที่มีความเสี่ยงสูงซึ่งอากาศยานไร้คนขับนั้นมีส่วนประกอบหลายส่วน แต่ส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากที่สุดคือส่วนของใบพัด เนื่องจากเป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการพาตัวอากาศยานไร้คนขับไปยังสถานที่ต่างๆ และเมื่อนำไปใช้งานก็มักจะเกิดความเสียหายจากส่วนนี้มากที่สุด เป็นผลเนื่องมาจากได้รับแรงกระแทกจาก

การลงจอด กระแทกไม้หรือโชดหินทำให้เกิดการแตกหัก และฉีกขาดทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัวไบพัตใหม่ ซึ่งมีราคาแพง เนื่องจากเป็นสินค้านำเข้าจากต่างประเทศ โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตไบพัตไดรอนมักจะเป็นพวกคาร์บอนไฟเบอร์ ไนลอน ไฟเบอร์กลาส โทเทเนียม เป็นต้น เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา มีความแข็งแรงสูง [4] และยังมีวัสดุอีกหนึ่งชนิดที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อวัสดุคอมโพสิตคือ อีพ็อกซีเรซิน ซึ่งจะใช้เป็นสารที่ช่วยในการยึดเกาะ ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ยังให้ความเป็นมันวาวแก่ไบพัต แต่อย่างไรก็ตามอีพ็อกซีเรซินมีข้อเสียคือ ความแข็งเปราะแตกหักง่าย และมีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่เกิดการเชื่อมขวางสูง โครงสร้างที่เกิดการเชื่อมโยงที่สูงนำไปสู่พฤติกรรมการเปราะ ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกหักและการขยายตัวของรอยแตกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [5, 6] จากข้อเสียดังกล่าวสามารถทำการปรับปรุงได้ เพื่อให้สามารถรับแรงกระแทกได้ดี มีความต้านทานต่อการฉีกขาดและความยืดหยุ่นที่ดียิ่งขึ้น ทำได้โดยการนำเส้นใยมาเสริมประสิทธิภาพของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน [4, 7] ซึ่งส่งผลให้ลดความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตัวไบพัตได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ตัวไบพัตมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดียิ่งขึ้น และการทำงานมีความปลอดภัยมากขึ้น

จากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวไบพัตพบว่าสามารถแก้ไขหรือปรับปรุงได้โดยการนำยางธรรมชาติมาใช้เพื่อปรับปรุงความเหนียวของอีพ็อกซีเรซิน [8] เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียวติดที่ดี มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง มีความสามารถในการดูดซับและกระจายพลังงานได้ดี แต่ยางธรรมชาติไม่มีความเป็นขั้ว จึงทำให้ผสมเข้ากับอีพ็อกซีเรซินซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นขั้วสูงได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการดัดแปรโมเลกุลของยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มความเป็นขั้วในสายโซ่โมเลกุล โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ทำให้เกิดวงแหวนอีพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) ตรงตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ เรียกว่า “ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber)” [9] เมื่อนำยางธรรมชาติอีพอกไซด์มาผสมกับอีพ็อกซีเรซินจะทำให้วัสดุทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วที่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามการเติมเฟสยางลงในอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมโพสิตมีค่าลดลง [10] ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงดังกล่าว จึงมีการประยุกต์ใช้สารตัวเติมเสริมแรงในอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งสมบัติของสารตัวเติมนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค คือหากสารตัวเติมมีอนุภาคที่ใหญ่จะเสริมแรงได้น้อยกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เนื่องจากอนุภาคที่ขนาดใหญ่มีพื้นที่สัมผัสน้อย ทำให้เกิดอันตรกิริยากับยางได้ยาก ขณะเดียวกันสารตัวเติมเสริมแรงขนาดอนุภาคเล็กจะเสริมแรงได้ดีกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจึงทำให้เกิดอันตรกิริยากับยางได้ดี

ดังนั้นการนำสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน (Nanofiller) โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 100 nm หรือต่ำกว่านั้นทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นผิวสัมผัสจำนวนมาก จึงทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดี ทำให้เสริมแรงได้ดีมากขึ้น [11] การใช้นาโนซิลิกา ปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการล้าและความต้านทานต่อการฉีกขาดของอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งซิลิกา เป็นสารประกอบของซิลิกอน และออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสี หรือเป็นผลึกสีขาว สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติหรือทำการสังเคราะห์ขึ้นมา [12] ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากมีสมบัติเด่นคือ ความต้านทานต่อแรงดึง ค่าโมดูลัสและความแข็งแรงสูง ช่วยเพิ่มความเสถียรต่อความร้อน สามารถนำไฟฟ้าได้ดีและมีสมบัติทางแสง (Optical properties) ที่ดีไม่กระเจิงแสงเมื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความใส [13] นาโนเซลลูโลสเป็นความหวังใหม่ในการผลิตพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนในยุคอนาคต เมื่อเร็วๆ นี้ นาโนเซลลูโลสได้รับความสนใจจากนักวิจัยมากมาย อันเนื่องมาจากความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากความแข็งแรงและความคงทนสมบัติที่น่าสนใจอื่นๆ ของอนุภาคเซลลูโลส ดังนั้นการนำนาโนเซลลูโลสมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเซลลูโลสสามารถแยกได้จากแหล่งต่างๆ ของพืชรวมทั้งสาหร่าย และสัตว์ทะเล นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม รวมถึงเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [14]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงข้อเสียของใบพัดโดรนด้วยการนำยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxydized natural rubber, ENR) ผสมร่วมกับอีพ็อกซีเรซิน โดยใช้สารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรสองชนิดได้แก่ นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส เพื่อเพิ่มสมบัติต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับพลังงานของใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อปรับปรุงออกสูตรให้มีสมบัติเชิงกล เช่น เพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกและความแข็งแรง คอมโพสิตใบพัดโดรนดีขึ้น

1.2.2 เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 25, ENR 50) ที่ผสมลงในอีพ็อกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตใบพัดโดรน

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขนาดอนุภาคระดับนาโนซิลิกา และนาโนเซลลูโลสในยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ผสมอีพ็อกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไบพัตโดรน

1.2.4 ศึกษาความต้านทานต่อสภาวะการใช้งานของวัสดุนาโนคอมโพสิตต่อสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งก่อนและหลังทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน

1.2.5 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปไบพัตโดรนโดยเทคนิคแบบทามือ (hand lay-up)

1.2.6 เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถแก้ไขหรือปรับปรุงข้อเสียของตัวไบพัตอากาศยานไร้คนขับได้

1.3.2 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับยางธรรมชาติโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวไบพัตอากาศยานไร้คนขับ

1.3.3 เผยแพร่ไปยังหน่วยงานที่ได้รับผลประโยชน์จากงานวิจัยนี้ ได้แก่ อุตสาหกรรมการทำไบพัตโดรน เป็นต้น

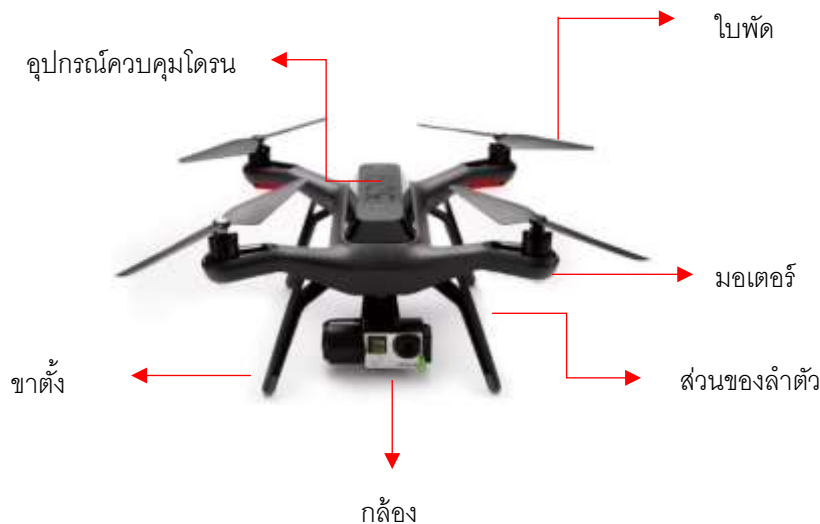
1.3.4 สามารถนำผลงานวิจัยไปแพร่ในงานประชุมวิชาการ หรือเผยแพร่ในวารสารวิชาการได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 อากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

อากาศยานไร้คนขับ (UAV) เป็นอากาศยานไร้คนขับที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งาน หรือเรียกสั้นๆ ว่า โดรน (Drone) ซึ่งสามารถควบคุมจากระยะไกลแบบอัตโนมัติที่ ต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และยังมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงเพื่อทำการบันทึกและแพร่ภาพสัญญาณมายังจอมอนิเตอร์ นอกจากนี้อากาศยานไร้คนขับยังสามารถทำหน้าที่เป็นหน่วยข่าวกรอง เพื่อค้นหาเป้าหมายและลาดตระเวนในพื้นที่ๆ มีความเสี่ยงหรือที่มนุษย์เข้าถึงได้ยาก ส่วนประกอบของโดรน แสดงดังรูปที่ 2.1

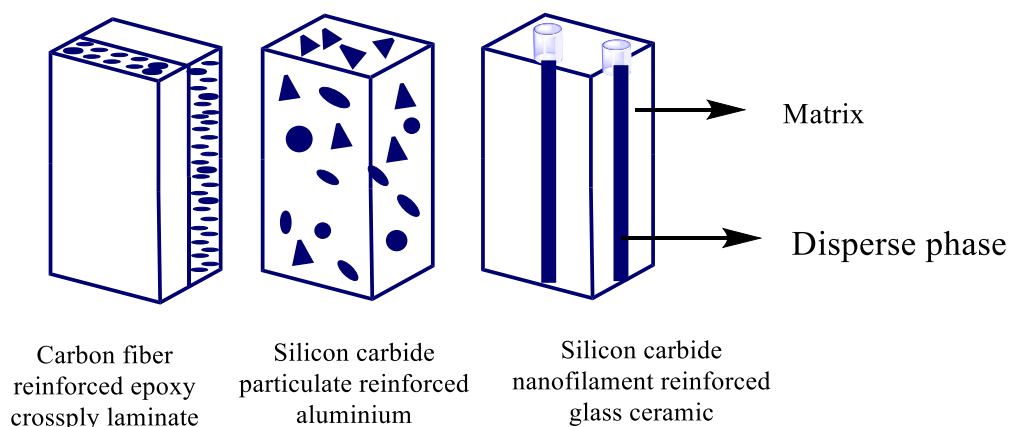


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของโดรน [15]

จากการใช้งานอากาศยานไร้คนขับ ส่วนที่ได้รับความเสียหายมักจะเป็นส่วนของใบพัด ซึ่งทำ จากวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากการได้รับแรงกระแทกและทำให้เกิดการแตกหักและฉีกขาด ทั้งนี้ใบพัดมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการนำโดรนไปยังที่ต่างๆ หากใบพัดเสียหายอาจจะส่งผลกระทบต่อ ส่วนประกอบอื่นๆ จนไม่สามารถใช้งานได้ [16]

## 2.2 วัสดุคอมโพสิต

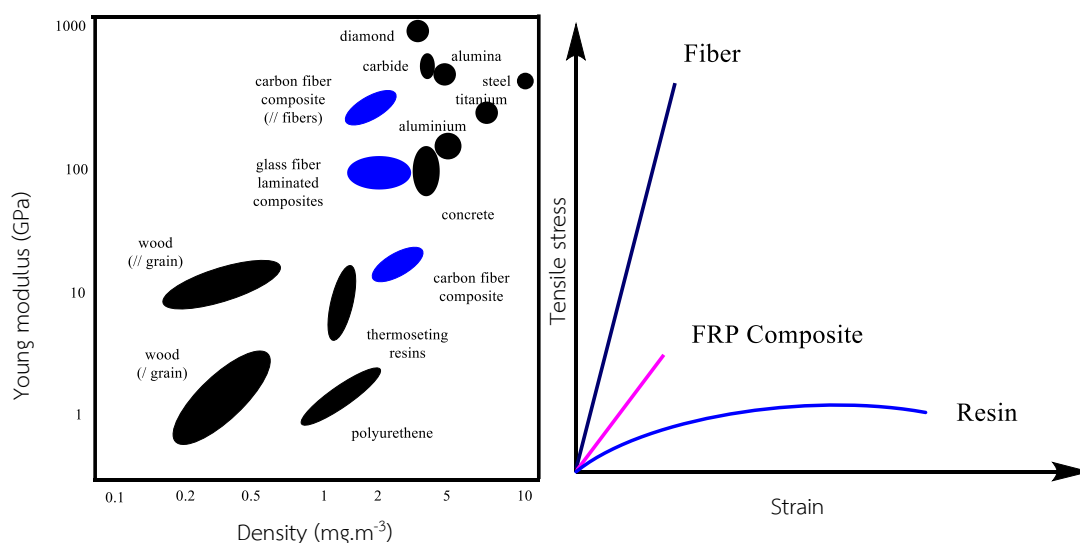
วัสดุคอมโพสิตเป็นสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous substance) ที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหรือมากกว่า ซึ่งแสดงคุณลักษณะของแต่ละองค์ประกอบทำให้ได้สมบัติตามที่ โดย องค์ประกอบดังกล่าวได้แก่ 1) องค์ประกอบเป็นเมทริกซ์ (Matrix) 2) องค์ประกอบที่กระจายตัวใน เมทริกซ์หลัก (Disperse phase) เช่น ไฟเบอร์ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.2 วัสดุคอมโพสิตแบ่งออกตามชนิดของเมทริกซ์ได้เป็น คอมโพสิตจากโลหะ (Metal matrix composite, MMCs) คอมโพสิตจากเซรามิกซ์ (Ceramic matrix composites, CMCs) และ คอมโพสิตจากพอลิเมอร์ (Polymer matrix composites, PMCs) [17]



รูปที่ 2.2 วัสดุคอมโพสิตแบ่งออกตามชนิดของเมทริกซ์

ซึ่งในงานวิจัยขอกกล่าวถึงพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเมอร์บางชนิด เช่นอีพ็อกซีเรซินและ พอลิเอสเทอร์มักมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้มีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เป็นต้น แต่พอลิเมอร์คอมโพสิตมีจุดเด่นเรื่อง ขึ้นรูปง่าย สามารถขึ้น รูปทรงที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้ง่าย และมีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่นต่ำ) ขณะที่วัสดุ เช่น แก้ว อะรามิด (Aramid) และโบรอน (Boron) มีจุดเด่นเรื่องความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทาน ต่อแรงกดสูง แต่วัสดุที่กล่าวมาข้างต้นเมื่ออยู่ในรูปของแข็ง สมบัติเด่นเหล่านี้ปรากฏออกมาไม่เด่นชัด เนื่องจากวัสดุสามารถแตกหักจากความเค้นได้ง่าย เพียงแค่ผิวของวัสดุมีรอยตำหนิขนาดเล็กเท่านั้น ดังนั้นการผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งจะทำให้วัสดุมี สมบัติที่ดีขึ้น เพราะเป็นการรวมเอาจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์ กับจุดเด่นของเส้นใยเสริมแรงเข้าไว้

ด้วยกัน โดยเนื้อหลักของพอลิเมอร์จะทำหน้าที่กระจายแรงที่กระทำต่อวัสดุลงไประหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังทำหน้าที่ปกป้องเส้นใยไม่ให้เกิดการเสียหาย เนื่องจากการเสียดสีและการกระแทก ผลของการรวมพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรง ทำให้วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตมีจุดเด่นหลายอย่างได้แก่ มีค่าความแข็งแรงและความแข็งตึง (Stiffness) สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย น้ำหนักเบา และทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ [18]



รูปที่ 2.3 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงในคอมโพสิต

## 2.3 วัสดุนาโนคอมโพสิต

วัสดุนาโนคอมโพสิตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการนำวัสดุอย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมกัน โดยวัสดุทั้ง 2 ชนิด มีสมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้เป็นการนำข้อดีของวัสดุทั้งสองชนิดมารวมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจะมี 2 ส่วน คือ

1) เมทริกซ์ (Matrix) โดยเมทริกซ์จะเป็นส่วนที่ช่วยในการหล่อหุ้มและยึดสารตัวเติมเข้าไว้ด้วยกัน ตัวเมทริกซ์โดยทั่วไปจะมีความเหนียวความแข็งแรงต่ำกว่าสารตัวเติมเสริมแรง ดังนั้นหน้าที่ของเมทริกซ์คือช่วยให้มีการกระจายตัวถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกต่อสารตัวเติมและกำหนดรูปร่างของวัสดุคอมโพสิต

2) สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ที่ขนาดเล็กกว่า 100 nm ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่เชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้น ถึงแม้ว่าจะเติมลงไปเพียง 1-10 เปอร์เซ็นต์



ของน้ำหนักรวมเมื่อเทียบกับการคอมโพสิตโดยทั่วไป ทำให้สารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm ได้รับความสนใจทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมในการนำวัสดุนาโนคอมโพสิตมาใช้งาน โดยปกติแล้วการทำใบพัดจะนิยมใช้อยู่ในรูปของคอมโพสิต โดยมีเมทริกซ์หลักเป็นอีพ็อกซีเรซินและมีสารตัวเติมเสริมแรงอยู่ในกลุ่มไฟเบอร์ ดังนั้นเห็นได้ว่าสมบัติของยางธรรมชาติเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาใช้ในการปรับปรุงใบพัดอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากยางธรรมชาติมีความทนต่อการฉีกขาด สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซ มีความยืดหยุ่นได้ดี ด้านทานการต่อกระแทก ทำให้สามารถช่วยปรับปรุงความแข็งแรงเปราะของอีพ็อกซีเรซินได้ เป็นต้น [19]

## 2.4 อีพ็อกซีเรซิน

อีพ็อกซีเรซินจัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ที่มีความสำคัญมากต่อการใช้งานที่มีความหลากหลายมีศักยภาพสูงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลายเนื่องจากมีสมบัติในช่วงกว้าง โดยใช้เป็นสารเคลือบป้องกันผลิตภัณฑ์เพื่อความยึดติดกับโครงสร้างและใช้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ในการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเช่น คาร์บอนไฟเบอร์และเส้นใยแก้วในการผลิตวัสดุคอมโพสิต อีพ็อกซีเรซินมีความต้านทานต่อไฟฟ้าสูงและมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งมีการงอตัวที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับโพลีเอสเตอร์ [20] และที่อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ที่สูง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการยึดเกาะที่พื้นผิวได้ดี เมื่อมีการใช้ร่วมกับเส้นใยที่เป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต อีพ็อกซีเรซินมีการหดตัวระหว่างการบ่มต่างจากโพลีเอสเตอร์ และไวนิลอีเทอร์เรซินที่สามารถหดตัวได้ถึง 12% โดยปริมาตร (โดยเฉพาะมีการลดลงของปริมาตรการหดตัวที่อยู่ในช่วง 5-12% และ 5-10% ของโพลีเอสเตอร์และไวนิลอีเทอร์เรซินตามลำดับ) แต่ในส่วนของอีพ็อกซีเรซินจะมีการหดตัวที่น้อยกว่า 5% [21] เช่นเดียวกับอีพ็อกซีลามิเนต ซึ่งจะมีความเสถียรมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเรงนานกว่าโพลีเอสเตอร์หรือไวนิลเอสเตอร์ลามิเนต เนื่องจากโครงสร้างไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในระหว่างการบ่มทำให้มีการปลดปล่อยแก๊สที่เป็นพิษน้อยกว่าโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในเทคโนโลยีโมลแบบเปิดในกระบวนการผลิต [22]

อีพ็อกซีเรซินสามารถนำมาใช้ได้ในกระบวนการผลิตคอมโพสิต เช่น ฉงสุญญากาศและหล่อใต้น้ำเกลือ การขึ้นรูปโดยใช้แรงดัน (pressure-bag molding) การขึ้นรูปแบบอัดฉีดและการขึ้นรูปร่วมกับเส้นใย ส่งผลให้ระบบเหล่านี้เป็นจุดสนใจในทางวิศวกรรม คือความที่จะปรับตัวทางกายภาพและการประมวลผลสมบัติโดยการปรับเปลี่ยนระบบในการผสมของอีพ็อกซีเรซินหรือโดยการเติมสารหน่วงไฟหรือสารเพิ่มความทนทาน ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการประยุกต์นำมาใช้งานกับพวกกระแสไฟฟ้า

มากขึ้นโดยใช้อีพ็อกซีเรซินมาปรับปรุงได้โดยใช้สารตัวเติมที่มีให้สมบัตินำไฟฟ้า เพื่อให้ได้คอมโพสิตที่นำไฟฟ้า เช่น ท่อนาโนคาร์บอนหรือผงโลหะ เป็นต้น

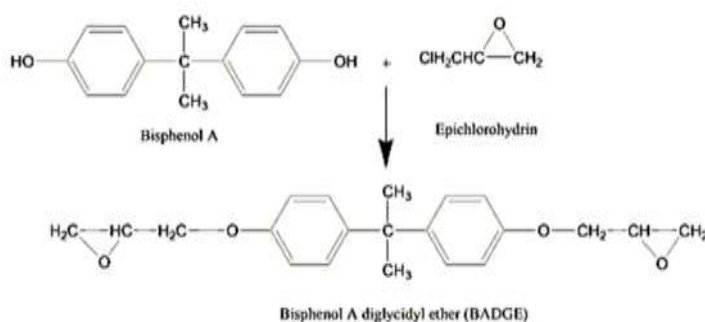
อีพ็อกซีเรซินจะแสดงสมบัติที่ดีหลายอย่างแต่ตัวเลือกที่ดีที่สุดที่ใช้สำหรับงานวิศวกรรม คือ ในหมู่เทอร์โมเซตติง

- ไม่มีการปล่อยก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อระหว่างขั้นตอนปฏิกิริยาบ่ม
- สามารถเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีความหลากหลายทางด้านความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์จากยางที่มี  $T_g$  ต่ำถึงวัสดุที่มี  $T_g$  สูง
- มีสมบัติการยึดเกาะกับวัสดุหลายอย่างอันเนื่องมาจากความเป็นขั้วในหมู่โครงสร้าง
- ความเป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนระบบเรซินที่จะให้สมบัติดี เช่น สมบัติทางไฟฟ้าหรือสมบัติทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น

### 2.3.1 ประเภทของอีพ็อกซีเรซินทางการค้า [23]

#### 2.3.1.1 ไดโกลซิไดล อีเทอร์บิสฟีนอล เอ

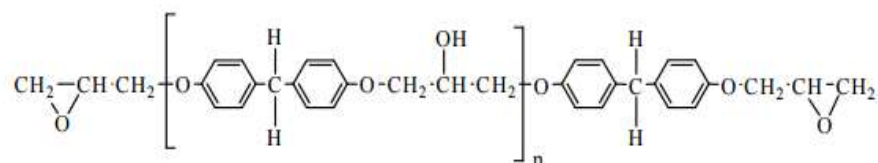
บิสฟีนอล-เอ-ไดโกลซิไดลอีเทอร์ (bisphenol A diglycidyl ether) หรือ BADGE เป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระป๋อง โดยใช้เป็นแล็กเกอร์หรือสารเคลือบทั้งภายในและภายนอกของกระป๋องเพื่อป้องกันรอยขีดข่วน สนิม และการปนเปื้อนของโลหะลงสู่อาหารที่บรรจุกระป๋องสาร BADGE ผลิตจากสารบิสฟีนอลเอและอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) โดยปฏิกิริยาการเกิด BADGE แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดบิสฟีนอล-เอ-ไดโกลซิไดลอีเทอร์ [23]

### 2.3.1.2 ไดโกลซิดิล อีเทอร์บิสฟีนอล เอฟ

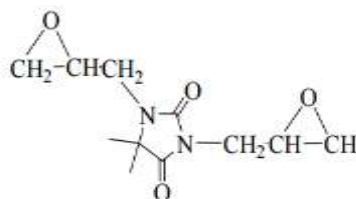
นอกจากบิสฟีนอล เอ แล้วยังมีฟีนอลอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการทำปฏิกิริยากับอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ไดโกลซิดิล อีเทอร์บิสฟีนอล เอฟ (Diglycidyl ether of bisphenol-F epoxy) หรือ DGEBF ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งผลิตโดยใช้วิธีเดียวกับการเตรียม DGEBA แต่ DGEBF มีความหนืดต่ำกว่า รวมถึงมีสมบัติทางกลและทางเคมีที่ดีกว่าวัสดุ DGEBA [23]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ bisphenol F [23]

### 2.3.1.3 ไฮแดนโทอิน เรซิน (Hydantoin resin)

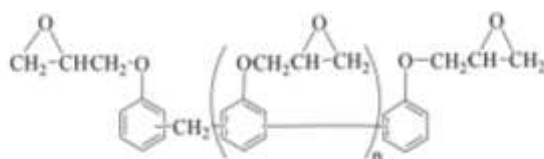
ไฮแดนโทอิน เรซิน เป็นเรซินชนิดพิเศษ ซึ่งเป็น glycidylated hydantoin และอนุพันธ์ของไฮแดนโทอิน เรซิน ซึ่งไฮแดนโทอิน เรซิน ถูกนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถเพิ่มความต้านทานต่ออุณหภูมิและมีการปรับปรุงเครื่องจักร ทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวในโครงสร้างคอมโพสิต แต่ hydantoin resins มีปัญหาคือความเป็นพิษทำให้เวลานำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ต้องความระมัดระวังเป็นพิเศษ [24]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ hydantoin resins [24]

### 2.3.1.4 เรซินฟีนอลิโ (Novolacs)

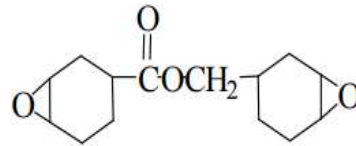
เรซินฟีนอลิโเป็นอีพ็อกไซด์ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ หรือการแทนที่ของฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ซึ่งจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ Novolacs [25]

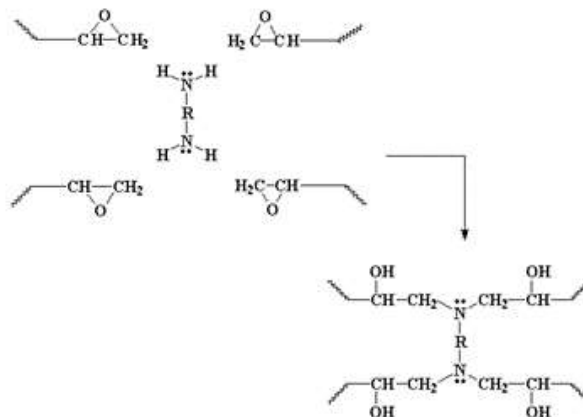
### 2.3.1.5 เปอร์อะซิติก เรซิน (Peracid resin)

อีพ็อกซีเรซินตัวนี้จะมีส่วนในการช่วยให้เพิ่มความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูง โดยจะมีความหนืดต่ำเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินชนิด novolac และ DGEBA [25]

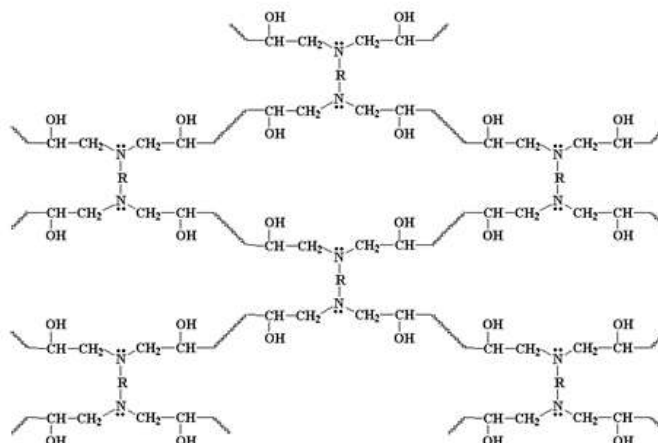


รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ Peracid resin [25]

อย่างไรก็ตามเรซินเหล่านี้ยังมีข้อเสียต่างๆ เช่น ความต้านทานต่อการแตกหักต่ำ มีความแข็งแรง [6, 26, 27] จากข้อเสียดังกล่าวของอีพ็อกซีเรซิน จึงนำยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์มาใช้ ในการปรับปรุงข้อเสียดังกล่าว ได้แก่ ความต้านทานต่อการแตกหัก ความแข็งแรง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้อีพ็อกซีเรซินชนิดไดโกลซิซิล อีเทอร์บิสฟีนอล เอ เนื่องจากเป็นอีพ็อกซีเรซินที่นิยมใช้ในการผลิตคอมโพสิตไบพอดิโอรน และสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด เมื่อนำอีพ็อกซีเรซินเรซิน ผสมฮาร์ดเดนเนอร์ สารทั้งสองชนิดจะทำปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.9 และ 2.10

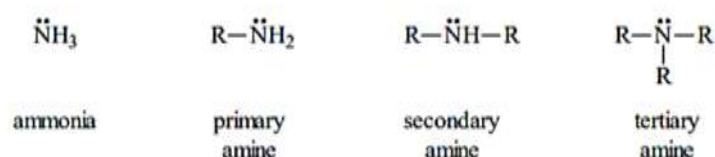


รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์ [27]



รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาการคงรูปของอีพ็อกซีเรซิน [27]

ซึ่งสารคงรูปที่ใช้ในงานวิจัย จัดอยู่ในสารประกอบเอมีน เอมีนเปนอนุพันธ์อินทรีย์ (organic derivatives) ของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) โดยมีหมู่ alkyl หรือ aryl เข้ามาแทนที่ไฮโดรเจนในเอมีน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามจำนวนหมู่แทนที่ที่มาต่อกับอะตอมไนโตรเจน (N) ได้แก่ primary ( $1^\circ$ ) amine (มีหมู่แทนที่ (substituents) 1 หมู่), secondary ( $2^\circ$ ) amine (มีหมู่แทนที่ 2 หมู่) และ tertiary ( $3^\circ$ ) amine (มีหมู่แทนที่ 3 หมู่) ซึ่งสูตรทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.11

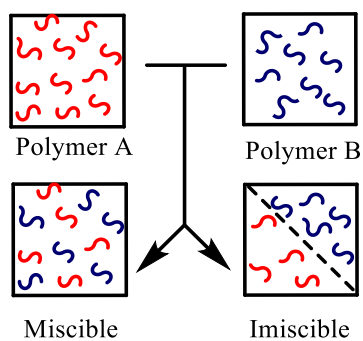


รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างทั่วไปของเอมีน

โดยสารคงรูปที่ใช้จัดเป็น primary ( $1^\circ$ ) amine เอมีนเปเนบสออน ซึ่งมีจุดเดือดสูงกว่า alkane แต่ต่ำกว่า alcohol ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะไนโตรเจนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ต่ำกว่าออกซิเจน ดังนั้นพันธะ N-H จึงมีขั้วน้อยกว่าพันธะ O-H ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ที่แข็งแรงน้อยกว่า โมเลกุลของ primary และ secondary amines สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ (intermolecular hydrogen bond) และยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้อีกด้วย แต่สำหรับ tertiary amine จะไม่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ นอกจากเกิดกับน้ำทำให้ tertiary amine มีจุดเดือดที่ต่ำกว่า primary และ secondary amines ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน [28]

## 2.5 พอลิเมอร์ผสม

การทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วเป็นไปได้ยาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ใด ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดีบางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (Energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิด เข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ผสมมี 2 ชนิดคือพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ (Miscible) และพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้ (Immiscible) ซึ่งแสดงดังรูป 2.12



- |               |                    |
|---------------|--------------------|
| -เฟสเดียว     | -สองเฟสหรือมากกว่า |
| - Tg ค่าเดียว | - Tg มากกว่า 1 ค่า |

รูปที่ 2.12 ความแตกต่างระหว่างพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน

#### 2.4.1 กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูด ระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (Stress concentration) จากดิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีใน ระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม เพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

#### 2.4.2. วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์หลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ [29]

### 2.6 คอมโพสิทยาง

การใช้ยางเพียงชนิดเดียวในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางไม่ค่อยเพียงพอ เนื่องจากการใช้งานของยางคือการใช้งานเชิงวิศวกรรมที่ต้องการสมบัติการใช้งานสูง เช่น ความแข็งแรง โมดูลัส สมบัติการดูดซับพลังงานหรือสมบัติการทนต่อการสึกกร่อนที่ดีเยี่ยม จำเป็นที่จะต้องใช้อย่างมากกว่าหนึ่งชนิดหรือเสริมแรงยางด้วยวัสดุอื่นเช่น เขม่าดำ ซิลิกา เส้นใยและสิ่งทอหรือโลหะ (ยางคอมโพสิท) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สำหรับคอมโพสิทยางโดยการติดกันระหว่างยางและวัสดุอื่นๆ ที่ใช้จะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมบัติของคอมโพสิทยางทั้งชนิด รูปแบบ และการจัดเรียงตัวภายในยางของวัสดุที่ใช้ เพื่อช่วยให้สามารถออกแบบคอมโพสิทยางให้มีสมบัติที่ได้มีความหลากหลายและมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง [30]

### 2.7 นาโนเทคโนโลยีของยาง

นาโนเทคโนโลยี (Rubber Nanotechnology) สามารถเพิ่มโอกาสใหม่ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตเช่น นาโนคอมโพสิทของยางและเคลย์ นาโนคอมโพสิทของยางและซิลิกา โดยมีตัวอย่างวัสดุใหม่ที่ได้จากการนำวัสดุนาโนเทคโนโลยีมาใช้กับยาง เช่น นาโนคอมโพสิทยาง/เคลย์ได้ช่วยให้สมบัติการซึมผ่านของก๊าซลดลง มีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น และสมบัติการหน่วงไฟที่ดีขึ้น เป็นต้น ด้านนาโนเทคโนโลยียางคือ การเตรียมอนุภาคนาโนการตัดแปรรูปร่างวิธีใหม่โดยเรียงตัวอนุภาคนาโนเป็นชั้นๆ เพื่อให้ได้ยางมีสมบัติของพื้นผิวตามที่ต้องการ เช่น พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface) และพื้นผิวที่ลื่นไม่ติด (Non-stick surface) เป็นต้น [31]

## 2.8 สารนาโนคอมโพสิตที่ใช้กับอีพ็อกซีเรซิน

โดยการศึกษาสมบัติการเหนียวติดที่ผิวหน้าของอีพ็อกซีเรซินกับแคลเซียมคาร์บอเนตนาโนคอมโพสิต ทำการศึกษาที่อัตราส่วน 3.5 %wt แปรอัตราการบ่มเร่งที่ 110 °C 1 hr 150 °C 2 hr และ 200 °C 1 hr จากการศึกษาพบว่าผลความต้านทานต่อแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตและค่าโมดูลัสสูงขึ้น แต่ความยืดหยุ่นนั้นคงที่ ส่งผลให้เห็นถึงการปรับปรุงความเหนียวติดได้โดยไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนไป [32]

ผลของการกระจายตัวของสารเสริมแรงที่เป็นท่อนาโนคาร์บอนจะมีความสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในการคอมโพสิตเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนกับอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิตจะลดการสูญเสียความร้อน จากการศึกษาโดย DSC ความร้อนในการคงรูปลดลงเมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนและการกระจายตัวเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากท่อนาโนคาร์บอนช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง [33]

ผลการศึกษาค่าความหนืดที่เกิดขึ้นจากนาโนซิลิกาในอีพ็อกซีเรซินจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและการกระจายตัว ซึ่งจากการศึกษาพบว่านาโนซิลิกาเป็นสารที่นำมาใช้เป็นตัวลดความหนืดที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปคอมโพสิต [34]

การปรับปรุงพบว่าเคลือบที่มีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นบางๆ ขนาดนาโนมีผลเป็นอย่างมากต่อเมทริกซ์ความยืดหยุ่นของอีพ็อกซีเรซินซึ่งจะช่วยให้การปรับปรุงทั้งความเหนียวติดและความแข็งแรง อีกทั้งยังได้รับการปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนและสารเคมีอีกด้วย [35, 36] และจากการเติมเคลือบจะเห็นได้ว่าผิวของเคลือบนั้นมีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ได้อย่างต่อเนื่องเนื่องจากผิวของนาโนคอมโพสิตที่แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของเฟสจึงส่งผลให้เคลือบมีประสิทธิภาพมากในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ

Bozkurt et al, 2007 ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความร้อนของเส้นใยแก้ว / เคลือบ / นาโนคอมโพสิตอีพ็อกซี พวกเขาพบว่า การเติมเคลือบจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการดัดงอ ซึ่งจะปรับปรุงในส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงของเส้นใยแก้วและอีพ็อกซี [37]

## 2.9 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่มีการใช้ในการทำไบพัต

จากการศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและแบบจำลองในการใช้ในลอนในการทำไบพัตอากาศยาน ซึ่งในลอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นในลอน 6 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ให้สมบัติเชิงกลดี เนื่องจากได้รับการเสริมแรงด้วยใยแก้ว แล้วทำการแปรปริมาณ Montmorillonite ที่ปริมาณแตกต่างกันและใช้ในลอนต่างชนิดกัน ซึ่งในลอนที่ใช้มี NCH (Nylon 6-clay hybrid), NCC) และในลอน 6 ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก



และโมดูลัสแรงดึง พบว่าไนลอนที่ได้จากการคอมโพสิตจะให้สมบัติต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่นๆ จึงใช้ไนลอน 6 แทนอลูมิเนียมในการทำใบพัด [38]

ในการศึกษาใช้วัสดุคอมโพสิตในออกแบบและวิเคราะห์เพื่อประดิษฐ์ส่วนหางของ UAV โดยวัสดุสำคัญที่ใช้ในการผลิตประกอบไปด้วย เส้นใยแก้ว อีพ็อกซีเรซิน ฮาร์ดเดนเนอร์ โฟม และแว็กซ์ ซึ่งขั้นตอนในการผลิตคือ ตัดแผ่นเส้นใยแก้วให้ได้ขนาดและรูปร่างตามแบบโมลโดยวางด้านในของโมล จากนั้นก็ทำการทาแว็กซ์ที่ผิวโมล จากนั้นทำการผสมเรซินกับฮาร์ดเดนเนอร์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจากนั้นนำโมลทั้ง 2 มาประกบกัน แล้วใช้แคลมป์ยึดให้แน่น วางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 hr ชั่วโมง แล้วนำไปอบเป็นเวลา 5-6 hr ที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วนำมาตกแต่งเพื่อนำไปทดสอบ ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าสามารถนำวัสดุคอมโพสิตเส้นใยแก้ว (Glass fiber composite) มาใช้แทนอลูมิเนียมได้ถึงแม้ว่ากระบวนการผลิตจะแพงกว่าแต่ก็สามารถลดเชื้อเพลิงในระยะยาวและลดค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา [39]

## 2.10 การใช้ยางในการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน

การศึกษากการสังเคราะห์และลักษณะของยางธรรมชาติเหลือต่อการปรับปรุงผลของการกระแทกของอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งวัสดุที่ใช้ศึกษาเป็นยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ ส่วนอีพ็อกซีที่ใช้เป็นชนิด DGEBA ทำการคงรูปกับระบบไดเอมีนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ post cured ที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีการแปรปริมาณยางธรรมชาติเหลือ (LNR 5, 10, 15 และ 20 phr) หลังจากนั้นทำการทดสอบความต้านทานต่อความร้อน สมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของยาง LNR จะทำให้ความแข็งของอีพ็อกซีเรซินลดลง แต่จะทำให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าการใช้ LNR ที่ปริมาณ 15 phr มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและให้สมบัติความต้านทานการแตกหักที่เพิ่มขึ้น [40]

ในการศึกษาพฤติกรรมการบวมของอีพ็อกซี/dicyanamide ที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์วัสดุและสัดส่วน ENR (0, 5, 10, 15) และทำการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูป 150, 160 และ 170 °C โดยใช้เครื่อง DSC จากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดการเชื่อมโยงสูงขึ้นจะทำให้ค่าความเครียดและค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงขึ้น เมื่อปริมาณของยาง ENR มากขึ้นจะทำให้ความเป็นพลาสติกลดลงเป็นอย่างมากขึ้น และที่การคงรูปที่อุณหภูมิสูงแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซินในยาง ENR ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากยาง ENR มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน จึงมีความแข็งน้อยกว่าอีพ็อกซีเรซินทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งของอีพ็อกซีเรซินลดลง [41]

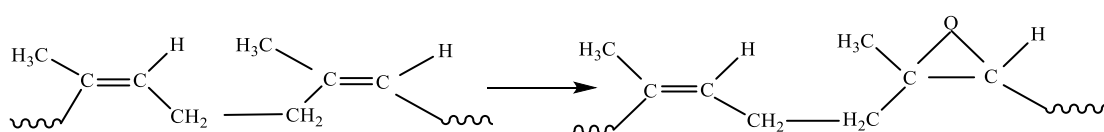
ศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลือ (LNR) ต่อสมบัติความแข็งของอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิต โดยทำการแปรปริมาณของยาง LNR ที่อัตราส่วน 3, 5, 7 และ 9 phr ผสมลงใน DGEBA (Epikote 1004)

และใช้สารวัลคาไนซ์ คือ Dicyandiamide (DICY or Epikure P104) อัตราส่วนที่ใช้ระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับสารวัลคาไนซ์ คือ 100:3 หลังจากนั้นส่วนผสมที่ได้ถูกบ้อนเข้าสกรูด้วยความเร็ว 80 rpm ช่วงอุณหภูมิที่ตั้งไว้คือ 105, 108, 112 และ 115 °C ในขณะที่เดียวกันยางจะถูกบ้อนเข้าไป ปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ แล้วจึงทำการผสมผงแป้งลงในแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิ 140 °C อุ้น 3 นาที แล้ววางไว้ อีก 10 นาที แล้วจึงนำชิ้นงานมาอัดขึ้นรูปในเตาอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 160 °C แล้วนำไปทดสอบสมบัติ ผลจากการทดสอบสมบัติความเหนียวของการแตกหักของอีพ็อกซี พบว่าการเติม LNR ที่อัตราส่วนที่ 3 phr แสดงให้สมบัติที่ดีที่สุด [42]

จากการศึกษาพอลิเมอร์ผสมของอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์โดยศึกษาปริมาณ หมู่อีพ็อกไซด์ในปริมาณต่างๆ ดังต่อไปนี้ 25, 40, 50, 60, 70 และ 80 mol% แล้วทำการแปรปริมาณ ของยางอีพ็อกไซด์ในปริมาณต่างๆ ดังนี้ 2, 5, 7 และ 10 phr ที่ใช้ผสมลงในอีพ็อกซีเรซินทำการผสม รูปแบบ casting แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้ปริมาณที่สามารถเติมยางอีพ็อกไซด์ลงไปได้แล้วทำให้สมบัติเชิงกลดีคือ ไม่เกิน 5 phr แต่เมื่อใส่ลงไปมากกว่า 5 phr ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง [8]

## 2.11 ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxidised natural rubber; ENR) ได้มาจากการนำน้ำยางธรรมชาติมาปรับปรุงโครงสร้าง โดยการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันระหว่างยางธรรมชาติกับ กรดเปอร์ออกซี ดังรูปที่ 2.13 ยาง ENR ได้มาจากการดัดแปรโมเลกุลจากยางธรรมชาติ ซึ่งยางธรรมชาติมีชื่อเรียกทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือมี isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่ n มีค่า ตั้งแต่ 150,00-20,000 [42]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ปรับสภาพโครงสร้าง (ENR)

ซึ่งยาง ENR มีองค์ประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนเป็นหลักร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นส่วนที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน ไขมัน และสารอนินทรีย์อื่นๆ จากสูตรโครงสร้างจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่จะเป็นไฮโดรคาร์บอนจึงไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงเข้ากับวัสดุที่มีขั้วได้น้อยหรือเข้ากันได้ยาก โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกันแบบอสัณฐาน แต่สามารถทำให้มีการจัดเรียงตัวกัน

ค่อนข้างเป็นระเบียบได้เมื่อถูกแรงดึงยืดมากกระทำ ทำให้เกิดผลึกส่งผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และการทนทานต่อการขีดสี เป็นต้น [9] แต่สมบัติเด่นที่เห็นได้ชัดของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น และสามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้เมื่อมีแรงมากกระทำ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าหากมีการใช้งานยางดิบเพียงอย่างเดียวจะให้สมบัติด้านอื่นๆ ไม่ค่อยดีมากนัก จึงได้มีการดัดแปลงโมเลกุลหรือทำการใส่สารตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติบางประการ จากข้อเสียที่ไม่ทนต่อสภาพอากาศ แสง UV ทำให้ได้มีการดัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติขึ้น โดยการเพิ่มหมู่ออกซิเจน ( $O_2$ ) ลงในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ซึ่งเตรียมจากน้ำยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ได้แก่ กรดเปอร์ฟอร์มิก หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ได้ยางที่มีความคงทนต่อสภาพอากาศ ความร้อนและตัวทำละลายอินทรีย์ได้ อีกทั้งยังเป็นสารช่วยในการยึดเกาะติดที่ดี จึงนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ในการผสม ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เนื่องจากทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้นและเข้ากับอีพ็อกซีเรซินที่นำมาใช้งานได้ดี [43] ยาง ENR มีสมบัติเหล่านี้ดีกว่ายางธรรมชาติ นั่นคือ ความทนทานต่อสารละลาย การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง สมบัติทนต่อการฉีกขาด การทำ epoxidation มักทำกับน้ำยางโดยใช้ peracetic acid, performic acid หรือส่วนผสมของ hydrogen peroxide กับ formic acid [44]

ยางธรรมชาติปรับโครงสร้างเป็นยาง ENR ดังรูปที่ 2.12 มีการผลิตในทางการค้า ได้แก่ ENR 25 และ ENR 50 โดยที่ยาง ENR 25 เป็นยางธรรมชาติที่มีจำนวนโมล 25 % ที่เกิดการอีพ็อกซิไดซ์ และ ENR 50 เป็นยางที่มีจำนวนโมล 50 % ที่เกิดการอีพ็อกซิไดซ์ สภาวะการทำปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันที่มีความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปิดออกของวงแหวนตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยจะพบแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3600-3200, 1780 และ 1068  $cm^{-1}$  เป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล คาร์บอนิลและอีเธอร์ [9] ซึ่งสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิต่ำ เกิดการเปิดวงอีพ็อกซิเพียงเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยใช้อินฟราเรดพบแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 870 และ 1240  $cm^{-1}$  เป็นหมู่อีพ็อกซิและไม่พบแถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล จากการใช้เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ตรวจสอบโครงสร้างเคมี พบพีคที่ตำแหน่ง 2.7 และ 5.05 ppm [45] เป็นพีคของคาร์บอนที่ตำแหน่งอีพ็อกซิและคาร์บอนที่ตำแหน่งของพันธะคู่แสดงระดับการเกิดปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันและพบว่าหมู่อีพ็อกซิที่เกิดขึ้นในโครงสร้างยางธรรมชาติจะเป็นแบบสุ่ม

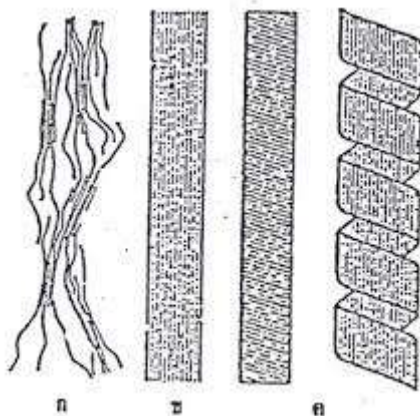
## 2.12 นาโนซิลิกา

ลักษณะทั่วไปของซิลิกาที่ใช้มากในอุตสาหกรรมยาง มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-40 nm ซิลิกาโดยทั่วไปจะไม่อยู่อย่างโดดเดี่ยว ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อน เรียกว่า แอกรีเกต (Aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) ซึ่งโครงสร้าง

เหล่านี้จะไม่สามารถทำลายได้ในระหว่างการบดผสม นอกจากนี้กลุ่มก้อนแอกกรีเกตของซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่มากขึ้นเรียกว่า แอกโกลเมอเรต (Agglomerate) ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) นาโนซิลิกา เป็นวัสดุที่มีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากการช่วยในเรื่องทนการกระแทก ลดการสะสมความร้อน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปัญหาในการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงยังคงมีปัญหา เนื่องจากการเกิดแนวโน้มการรวมตัวกันเองของนาโนซิลิกาที่สูงไม่เกิดการกระจายตัวไปในเนื้อยางได้โดยง่าย เนื่องจากแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของนาโนซิลิกา และด้วยความไม่เข้ากันดังกล่าว จึงทำให้ยางธรรมชาติซึ่งไม่มีซิลิกา ซึ่งมีซิลิกา ซึ่งมีซิลิกา และด้วยความไม่เข้ากันดังกล่าว จึงทำให้ยางธรรมชาติซึ่งไม่มีซิลิกา และมีซิลิกา และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ดีขึ้น ดังนั้นจึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้โดยการเติมสารไฮเลขนร่วมด้วย เป็นสารคู่ควบ เช่น bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si-69) และ 3-thiocyanatopropyl triethoxysilane (Si-264) ซึ่งผสมร่วมกับยางในกระบวนการคอมปาวด์ยางเพื่อปรับปรุงการเสริมแรงของนาโนซิลิกา ซึ่งหลากหลายงานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับผลการเติมนาโนซิลิกาลงในยางต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน [46]

### 2.13 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารคาร์โบไฮเดรต ที่เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืชทุกชนิด โดยมีสารอื่นร่วมเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่น เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เพกติน (Pectin) และลิกนิน (lignin) โดยเซลลูโลสอยู่ในชั้นในสุดของผนังเซลล์พืช ซึ่งจัดเรียงตัวอยู่ในชั้นไมโครไฟบริล (Microfibril) ที่ห่อหุ้มด้วยร่างแห (Matrix) ของเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีลักษณะแข็งหุ้มอยู่ชั้นนอกสุดของผนังเซลล์พืช โดยเซลลูโลสทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับพืช เซลลูโลสที่บริสุทธิ์ในธรรมชาติคือ โยฝ้ายหรือสาลี ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส ที่เรียกว่า  $\alpha$ -cellulose ประมาณ 98% ในไม้มีเซลลูโลสประกอบอยู่ประมาณ 40-50% ในต้นหญ้า และต้นถั่วที่มีอายุน้อยจะมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 15% ของน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้เซลลูโลสยังได้จากวัสดุทางการเกษตรต่างๆ ปริมาณของเซลลูโลสในพืชชนิดเดียวกันย่อมจะแตกต่างกันไป อาจขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ การจัดการและอายุการเก็บเกี่ยว โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (D-glucose) ตั้งแต่ 15 - 40,000 หน่วยต่อกันเป็นเส้นตรง (Linear homopolymer) ด้วยพันธะเบต้า-ไกลโคซิดิก ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และ 4 มีสูตรโมเลกุลเป็น  $(C_6H_{10}O_5)_n$  มีชื่อทางเคมีว่า  $\beta$ -1,4-glucan มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 300,000-500,000 ดาลตัน โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชมี 3 แบบ ดังรูปที่ 2.14 [47]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช [47]

ก. Fringe micelle ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous)

ข. โครงสร้างของเซลลูโลสที่ม้วนหรือพับไปตามแกนของเส้นใยเซลลูโลส

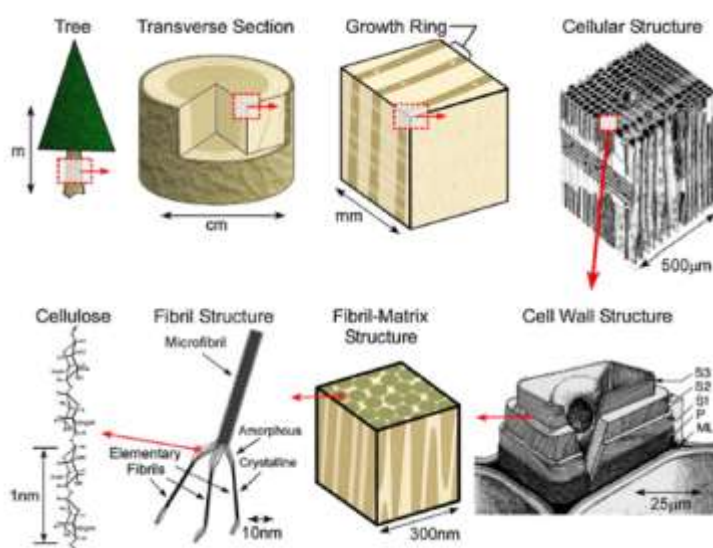
ค. โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบริบบิ้นและม้วนเป็นเกลียว

โครงสร้างที่แตกต่างกันถึง 3 แบบ และมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล จึงทำให้เซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติไม่อยู่ในรูปบริสุทธิ์ ส่วนมากมักจับกับแป้ง เพ็กติน ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีพวกพอลิแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส โปรตีน และแร่ธาตุอื่นๆ บางชนิดในปริมาณน้อย โมเลกุลของเซลลูโลสเป็นสายยาวและอยู่รวมกันเป็นมัด โดยจะมีแรงยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน การจัดเรียงตัวของโมเลกุลค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ จากการศึกษาโดย XRD พบว่าเส้นใยของเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกซึ่งเป็นระเบียบและส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ สำหรับส่วนที่เป็นผลึกในเส้นใยของเซลลูโลสนั้นโมเลกุลจะจัดตัวขนานกันและยึดติดกันอย่างมีระเบียบโดยพันธะไฮโดรเจน แต่สำหรับส่วนที่ไม่เป็นระเบียบนั้นจะมีจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมากกว่าส่วนที่เป็นระเบียบ ดังนั้นส่วนที่เป็นระเบียบจะเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรง ในขณะที่ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น

สมบัติของเซลลูโลส เซลลูโลสเป็นเส้นใยชนิดไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber, IDF) ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นไม่ละลายในด่าง และตัวทำละลายเป็นส่วนใหญ่ [48] เซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่สามารถดูดซับน้ำไว้ที่บริเวณผิวจึงเกิดการพองตัว เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจับตัวหนาหีบเป็นเส้นหยาบมีทั้งโมเลกุลที่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและ สวนทางกันทำให้เส้นใยแข็งแรง ไม่เปราะง่าย แต่มีบางส่วนที่โมเลกุลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จับกันไม่แน่นส่วนนี้เองที่สามารถดูดซับน้ำได้ จึงเกิดการพองตัว ซึ่งความสามารถในการพองตัวทั้งในน้ำและสารละลายจะแตกต่างกันไป โดยเมื่อ

เรียงลำดับตามความสามารถในการพองตัวของเซลลูโลสในสารละลายโดยเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ได้ดังนี้ ตัวทำละลายอินทรีย์ < น้ำ < เกลือ < กรด < ต่าง [49]

เซลลูโลสสามารถแยกได้จากแหล่งต่าง ๆ รวมทั้งสาหร่ายสัตว์ทะเล (Tunicate) และพืชชีวมวล เป็นวัสดุได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมพร้อมกับมีสมบัติกายภาพ สมบัติทางเคมีสมบัติทางชีวภาพ และสมบัติเชิงกล คำว่า "nanocellulose" ใช้เพื่ออธิบายถึงวัสดุที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ปัจจุบันได้มีการใช้นาโนเซลลูโลส เป็นสารเสริมแรงหรือใช้ทดแทนวัสดุนาโนคอมโพสิทชนิดอื่นๆ นาโนเซลลูโลสมีอยู่ในสองรูปแบบคือนาโนคริสตัลเซลลูโลส (CNCs) และเส้นใยนาโนเซลลูโลส (CNFs) [50] Nanofibrillated cellulose (NFC) ซึ่งเรียกว่าเซลลูโลสที่เป็นเส้นใยขนาดเล็ก (microfibrillated cellulose หรือ MFC) นาโนเซลลูโลสทั้งสองชนิด NFCs และ CNCs มีลักษณะทางเคมีคล้ายกัน แต่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน เนื่องจากมีรูปแบบคอลลอยด์ที่แตกต่างกัน CNCs มีลักษณะเป็นผลึกนาโนเซลลูโลสผลึกมักจะได้จากการย่อยกรดของวัสดุเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม CNFs เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของอนุภาค ซึ่งสามารถทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสทั่วไป เนื่องจากมีความสามารถในการตกผลึกและสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นร่วมกับพื้นที่ผิวสูง และความหนาแน่นที่ต่ำ



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลสจากไม้ [51]

รูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลสจากไม้ การสกัดเซลลูโลส เซลลูโลสทางการค้ามักผลิตจากไม้และฝ้าย วัตถุดิบเหล่านี้จะถูกสกัดโดยใช้กรดหรือด่าง ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง จากนั้นนำกากที่ได้มาฟอกสีและล้างน้ำหลายๆ ครั้งจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ [51]

ซึ่งกรดและด่างที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งช่วยทำลายลิกนินและสิ่งที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกไปโดยเซลลูโลสยังอยู่เหมือนเดิม

## 2.14 คาร์บอนไฟเบอร์

คาร์บอนไฟเบอร์หรือเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดหนึ่งที่มีความสนใจจากหลายอุตสาหกรรม ตั้งแต่สิ่งของที่ใช้เทคโนโลยีระดับสูงอย่างการผลิตอาวุธและเครื่องบินเรื่อยไปจนถึงสิ่งของที่พบได้ อุปกรณ์กีฬาเพราะวัสดุชนิดนี้มีสมบัติเด่นหลายอย่างแต่ที่โดดเด่นมากคือการเป็นวัสดุมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูงมาก คาร์บอนไฟเบอร์ยังมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี สมบัตินำไฟฟ้าได้ คาร์บอนไฟเบอร์มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนเหมือนกับถ่านและแกรไฟต์ โดยปกติเนื้อของวัสดุชนิดนี้ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 90 คาร์บอนไฟเบอร์เกิดจากเส้นใยคาร์บอนขนาดเล็ก 0.005-0.10 mm จำนวนมากมาควั่นเป็นสายได้ ประเภทของคาร์บอนไฟเบอร์ มีหลายแบบด้วยกันแต่เกณฑ์ที่นิยมใช้มี 2 วิธี ดังนี้

1) การแบ่งประเภทตามสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ ได้แก่ คาร์บอนไฟเบอร์ชนิด UHM (Ultrahigh Modulus) มีค่าโมดูลัส > 450 GPa ชนิด HM (High modulus) มีค่าโมดูลัส 350-450 GPa ชนิด IM (Intermediate Modulus) มีค่าโมดูลัสระหว่าง 200-350 GPa ชนิด HT (Low Modulus and High Tensile) มีค่าโมดูลัส < 100 GPa แต่ค่าต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) > 3.0 GPa ชนิด SHT (Super High Tensile) มีค่าความต้านทานแรงดึง > 4.5 GPa

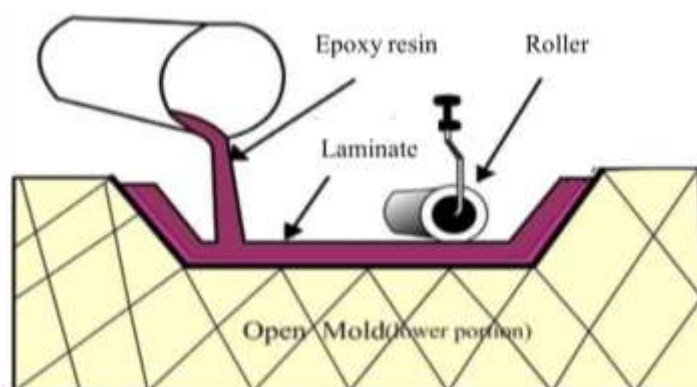
2) การแบ่งตามชนิดวัตถุดิบ เช่น พอลิอะคริโลไนทริล พิตช์ (Pitch, ของเหลวชั้นได้จากปิโตรเลียม) เป็นต้น ซึ่งสารพอลิอะคริโลไนทริลเป็นวัตถุดิบที่ทางอุตสาหกรรมนิยมใช้มากที่สุด การประยุกต์เพื่อการใช้งานอากาศยานมีการใช้คาร์บอนไฟเบอร์เป็นชิ้นส่วนเครื่องบิน เช่น เครื่องบิน Boeing B787 เป็นเครื่องบินที่ใช้คาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบของคอมโพสิต มากถึงร้อยละ 50 และมีการใช้เส้นใยคาร์บอนให้ความแข็งแรงต้องมีการใช้ร่วมกับเรซินรวมกันเป็นคอมโพสิต [52]

## 2.15 เทคนิคการขึ้นรูปคอมโพสิต

เทคนิคในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเส้นใย จะแบ่งตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง [53] ดังนี้

### 2.15.1 Hand lay-up

เทคนิคการขึ้นรูปแบบทามือเป็นเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบเรียบง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลาย ประสิทธิภาพของชิ้นงานที่ได้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของแต่ละบุคคล โดยวิธีการขึ้นรูปของกระบวนการขึ้นรูปแบบทามือขั้นแรกจะทำการจัดวางเส้นใยลงบนแม่พิมพ์แบบเปิดจากนั้นทำการทาอีพ็อกซีเรซินทับบนเส้นใยชั้นแรก จากนั้นวางเส้นใยอีกหนึ่งชั้นแล้วทาอีพ็อกซีเรซินทำสลับไปมา จนกระทั่งได้ความหนาหรือจำนวนของ Lay-up ที่ต้องการแล้วทำการไล่อากาศออกและปล่อยให้เกิดการคงรูปที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 2.16

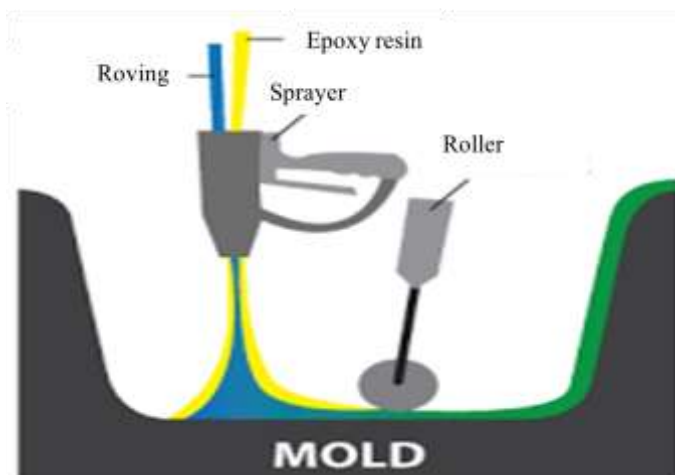


รูปที่ 2.16 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Hand-layup [53]

### 2.15.2 Spray-up

Spray-up เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย โดยกระบวนการขึ้นรูปนั้นจะแตกต่างกับวิธีการขึ้นรูปแบบ Hand-layup วิธีนี้จะนำใยแก้วแบบม้วนป้อนเข้าเครื่องพ่นที่มีตัวตัดหลังจากนั้นให้พ่นเส้นใยที่ถูกตัดแล้วโดยพ่นออกทางท่อพ่นพร้อมกับอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งจะต้องมีคนคอยกึ่งให้เส้นใยแก้วกับเรซินแนบติดกับโมลด์ เพื่อให้ได้ความหนา ปล่อยให้แห้งแล้วแกะออกจากโมลด์ ซึ่งวิธีแบบ Spray-up นั้นจะมีต้นทุนต่ำเหมาะกับงานในแนวตั้งที่มีขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 2.17



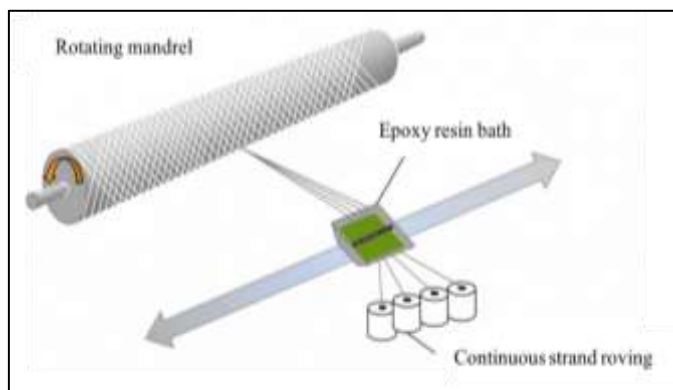


รูปที่ 2.17 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Spray-up [53]

จากการขึ้นรูปทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเหมาะกับการทำชิ้นงาน เช่น หลังคารถ แก้ว ี พระพุทธรูป ถึงขนาดเล็กถึงกลางที่ต้องการความแข็งแรง แต่มีน้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อน เป็นต้น แต่กระบวนการเหล่านี้ยังมีข้อเสียคือ ชิ้นงานจะมีความเรียบสม่ำเสมอกับตัวโมลด์เท่านั้นและยังมีความหนักของชิ้นงานอยู่

### 2.15.3 Filament Winding

Filament Winding เป็นวิธีสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกเท่านั้น โดยจะมีท่อและถังต่างๆ เป็นส่วนประกอบโดยป้อนเส้นใยแบบม้วนเส้นได้ เส้นใยวิ่งผ่านอ่างอีพ็อกซีเรซินขึ้นไปพันกับโมลด์ที่เป็นทรงกระบอกทาบไปมาจนทั่วโมลด์แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นจึงนำออกจากโมลด์ซึ่งลักษณะของชิ้นงานจะเป็นท่อกลวงใช้ในงานท่อหรือถังเท่านั้น แสดงดังรูป 2.18

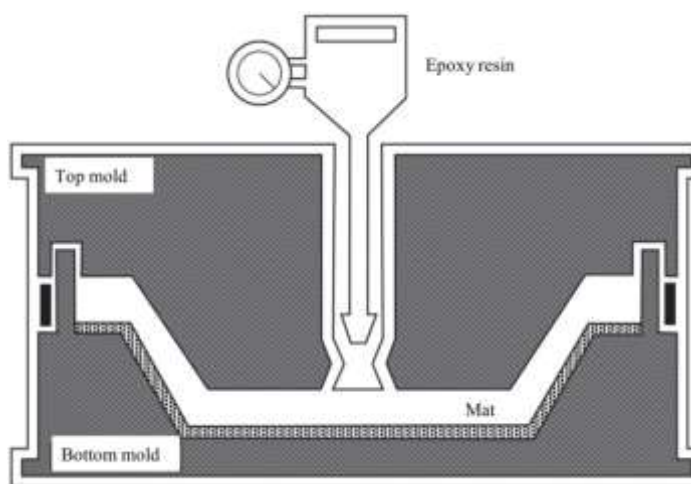


รูปที่ 2. 18 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Filament winding [53]

#### 2.15.4 Resin Transfer Molding (RTM)

RTM เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้โมลด์ประกบ ซึ่งจะทำการปิดโมลด์ตัวผู้กับตัวเมียให้สนิท จากนั้นฉีดอีพ็อกซีเรซินเข้าไปในโมลด์ให้ทั่ว ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยเส้นใยที่วางไว้ให้แห้งแล้วเปิดโมลด์เพื่อถอดชิ้นงานออก ข้อดีของการบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ RTM คือ ชิ้นงานจะมีผิวที่เรียบทั้งสองด้าน แต่ต้นทุนในการผลิตสูง และยังมีข้อเสียคือเรื่องของน้ำหนัก ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่

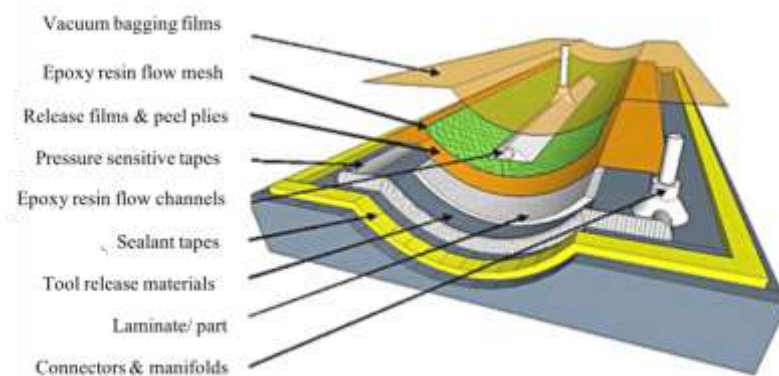
2.19



รูปที่ 2.19 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Resin Transfer Molding [53]

#### 2.15.5 Infusion

Infusion เป็นเทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันโดยอาศัยแม่พิมพ์ ซึ่งจะทำการวางเส้นใยลงไปบนโมลด์แล้วซีลโมลด์ให้สนิทด้วยฟิล์ม เพื่อกันรั่วต่อมาใช้ปั๊มดูดอากาศออก เพื่อให้เป็นสุญญากาศ ปล่อยให้อีพ็อกซีเรซินไหลเข้าโมลด์ด้วยแรงดูดของปั๊ม จะมีส่วนเกินของอีพ็อกซีเรซินในระบบนี้ น้อย เพราะจะมีระบบการดูดอีพ็อกซีเรซินส่วนเกินออก รอให้แห้งแล้วแกะชิ้นงานออก ข้อดีของระบบขึ้นงานมีน้ำหนักเบาว่าทุกระบบการขึ้นรูปและมีความสม่ำเสมอของชิ้นงาน ข้อเสียคือสิ้นเปลืองวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปอย่างมาก [53]



รูปที่ 2.20 ลักษณะการขึ้นรูปแบบ Infusion [53]

จากกระบวนการขึ้นรูปจึงได้ทำการเลือกวิธีการขึ้นรูปแบบ Hand lay-up เนื่องจากเป็นวิธีเหมาะสมแก่การขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ เพราะต้องการให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเบาและสม่ำเสมอ และมีความแข็งแรง อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

## 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.16.1 สารนาโนคอมโพสิตที่ใช้กับอีพ็อกซีเรซิน

Gautam และคณะ (2010) ศึกษาการทนต่อความร้อนและเปลวไฟโดย Non-halogenated อีพ็อกซีเรซินร่วมกับเคลย์นาโนคอมโพสิต วัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์คืออีพ็อกซีเรซินชนิด Bisphenol-A และ Bisphenol-S ส่วนสารตัวเติมที่ใช้เป็นนาโนเคลย์ ซึ่งได้รับการดัดแปลงโมเลกุลโดยทำการศึกษาอัตราส่วนของนาโนเคลย์ 1, 2.5, 5 wt% จากการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าอัตราส่วนที่ให้สมบัติดีที่สุดคือ นาโนเคลย์ 5 wt% ส่วนผลของการทนต่อเปลวไฟ ซึ่งได้รับการปรับปรุงทำให้มีความเสถียรทางความร้อนดียิ่งขึ้น [54]

Long และคณะ (2007) ได้รายงานว่สมบัติการเหนียวติดที่ผิวหน้าของอีพ็อกซีเรซินกับแคลเซียมคาร์บอเนตนาโนคอมโพสิตที่อัตราส่วน 3.5 wt% โดยทำการศึกษาเวลาการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110°C 1 h, 150°C 2 h และ 200°C 1 h ผลการทดลองพบว่าแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ค่าของความยืดหยุ่นคงที่ และการปรับปรุงความเหนียวติดได้ดี โดยไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนไป [55]

Kim และคณะ (2009) ได้อธิบายการกระจายตัวของสารเสริมแรงที่เป็นท่อนาโนคาร์บอนจะมีความสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในการคอมโพสิต เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนกับอีพ็อกซีเรซินช่วยลดความร้อนในการคงรูป ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนอาจจะไปขัดขวางปฏิกิริยาการเชื่อมโยง [33]

Kohn และคณะ (2011) พบว่าความหนืดที่เกิดขึ้นจากสารนาโนซิลิกาในอีพ็อกซีเรซินขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและการกระจายตัว โดยนาโนซิลิกาเป็นสารที่นำมาใช้จะเป็นตัวลดความหนืดที่เกิดขึ้นในการคอมโพสิต [34]

Messersmith และคณะ (1994) กับ Lan และคณะ (1995) พบว่านาโนเคลย์มีผลต่อความยืดหยุ่นของอีพ็อกซี สามารถปรับปรุงได้ทั้งความเหนียวติด ความแข็งแรง ความเสถียรทางความร้อน และความเสถียรต่อสารเคมี [35, 36]

Massam และคณะ (1998) พบว่าการเติมสารตัวเติมเคลย์จะการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์กันอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้เคลย์มีประสิทธิภาพมากในการปรับปรุงสมบัติในการคอมโพสิต [56]

#### 2.16.2 พอลิเมอร์ที่มีการใช้ในการทำไบพัต

Jaiganesh และคณะ (2014) รายงานการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและแบบจำลองในการใช้ Nylon คอมโพสิตในการทำไบพัตอากาศยานโดยใช้ไนลอน การทดลองที่ใช้เป็นไนลอน 6 เป็นพอลิเมอร์ที่ให้สมบัติเชิงกลดี เนื่องจากได้รับการเสริมด้วยใยแก้วโดยมีการเติม Montmorillonite (wt%) ที่มีความแตกต่างกันและใช้ไนลอนที่ไม่เหมือน ซึ่งไนลอนที่ใช้มี NCH (เป็น Nylon 6-clay hybrid), NCC (ได้จากคอมโพสิต) และไนลอน 6 สมบัติที่ศึกษาได้แก่ค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าไนลอนที่ได้จากการคอมโพสิตจะให้สมบัติต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวอื่น การใช้ไนลอน 6 มาเป็นตัวแทนอลูมิเนียมในการสร้างตัวไบพัตให้ความแข็งแรงเชิงกลสูงเมื่อเทียบกับราคาของไบพัตที่สร้างจากอลูมิเนียมและสามารถนำมาใช้งานได้ตามปกติ [38]

Raju และคณะ (2013) ศึกษาการใช้วัสดุคอมโพสิตในออกแบบประดิษฐ์ส่วนหางของ UAV วัสดุที่สำคัญใช้ผลิตประกอบ คาร์บอนไฟเบอร์ อีพ็อกซีเรซิน สารคงรูป โฟม และแว็กซ์ ซึ่งขั้นตอนในการผลิต คือตัดแผ่นเส้นใยแก้วให้ได้ขนาดและรูปร่างตามแบบโมล โดยด้านในของ UAV คือเส้นใยแก้วเพื่อเสริมความแข็งแรง แล้วทาแว็กซ์ให้ทั่วโมล แล้วทำการผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารเพิ่มความแข็งแรงในอัตราส่วนที่เหมาะสม นำโมลทั้งสองมาประกบกันให้แน่น จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 5-6 ชั่วโมง ตกแต่งเพื่อนำไปทดสอบ พบว่าสามารถนำวัสดุคอมโพสิตจากคาร์บอนไฟเบอร์ มาใช้แทนอลูมิเนียมได้ [57]

Madhusudhan และคณะ (2014) ออกแบบคอมโพสิตของไบพัตอากาศยาน วัสดุที่ใช้ผลิตคือ คาร์บอนไฟเบอร์ อีพ็อกซีเรซินมาเสริมแรงแทนพลาสติก พบว่าให้ความแข็งแรงที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับไบพัต

ที่ทำด้วยไม้และไม่ทำให้เกิดการเสีรูปร่างเมื่อนำคอมโพสิตไปใช้งาน มีความโค้งน้อยกว่าใบพัดที่ทำด้วยไม้โดยมีความแข็งดิ่งที่ดีขึ้น [58]

### 2.16.3 การใช้ยางในการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน

Saleh และคณะ (2014) การปรับปรุงผลของการกระแทกจากอีพ็อกซีเรซินใช้ยางธรรมชาติ โพรตีนต่ำ ส่วนอีพ็อกซีที่ใช้เป็นชนิดอีเทอร์ ไตไกลซิลิด อีเทอร์บิสฟีนอล เอ คงรูปกับ Diamine ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 1 h และ Post cured อุณหภูมิ 110 °C เวลา 2 h ที่แปร LNR (5, 10, 15, 20 phr) ความต้านทานความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยา ผลจากการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดิ่ง และความต้านทานต่อการดองของอีพ็อกซีเรซิน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง LNR ทำให้ความแข็งแรงของอีพ็อกซีเรซินลดลง แต่ทำให้แรงที่ในการดิ่งยืดเพิ่มขึ้น (tensile strain) วิเคราะห์ SEM ของการแตกหักพบการแยกเฟสกันเป็น 2 เฟสแต่ความต้านทานการแตกหักของอีพ็อกซีเรซินเพิ่มขึ้น [59]

Hong และคณะ (2004) ศึกษาพฤติกรรมการบ่มของระบบอีพ็อกซี/Dicyanamide ที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยมีการแปรอุณหภูมิในการคงรูปที่ 150, 160, 170 °C โดยใช้เครื่อง DSC พบว่าเวลาเมื่ออุณหภูมิการคงรูปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการคงรูปสูงขึ้นจะทำให้ค่า Strain และค่า shear strength สูงขึ้น เมื่อทำปริมาณยาง ENR มากขึ้น ความเป็นพลาสติกลดลง เมื่อคงรูปที่อุณหภูมิสูงเกิดการสลายตัวอีพ็อกซีเรซิน ในของยาง ENR ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ENR มีโครงสร้างที่ดีกว่าทำให้สมบัติเชิงกลของเรซินลดลง [41]

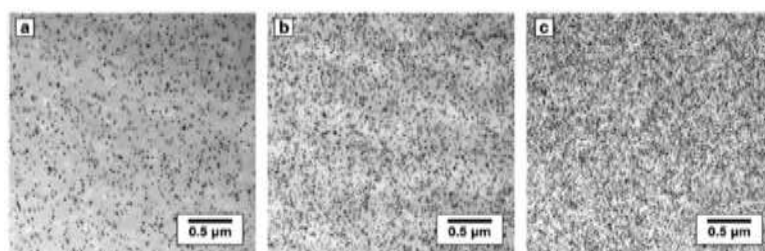
Seng และคณะ (2011) รายงานผลการศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลือต่อสมบัติความแข็งแรงของสารอีพ็อกซีคอมโพสิต โดยแปรปริมาณของยาง LNR ที่อัตราส่วน 3, 5, 7 และ 9 phr ผสมลงในอีพ็อกซีเรซิน (Epikote 1004) โดยใช้สารคงรูปคือ Dicyandiamide (DICY or Epikure P104) อัตราส่วนที่ใช้ระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับสารคงรูป คือ 100:3 ส่วนผสมจะถูกบ่อนเข้าสกรูด้วยความเร็ว 80 rpm ช่วงอุณหภูมิ 105, 108, 112 และ 115 °C หลังจากยางจะถูกบ่อนเข้าไป แล้วจึงผสมผงแป้งในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 140 °C อุณหภูมิ 3 นาที แล้วตั้งไว้อีก 10 นาที จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำให้คงรูปในเตาอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 160 °C ทดสอบสมบัติความเหนียวของการแตกหักของอีพ็อกซีเรซิน โดยใช้ LNR อัตราส่วนที่แตกต่างกันและสมบัติความเหนียวของการแตกหักของอีพ็อกซีเรซินที่เติม LNR ปริมาณ 3 phr ให้สมบัติที่ดีที่สุด [42]

Chuayjuljit และคณะ (2006) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของอีพ็อกซีและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เวลาการเกิดอีพอกไซด์ที่ 4, 6, 8, 10, 14 และ 16 ชั่วโมง เกิดปริมาณอีพอกไซด์ 25, 40, 50, 60, 70 และ 80% แปรปริมาณของยางอีพอกไซด์ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 2, 5, 7 และ 10 g และผสมลงในอีพ็อกซีเรซิน ผสมขึ้นรูปแบบ Casting ทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้คือเติมยางอีพอกไซด์ได้แล้วทำให้สมบัติเชิงกลดีคือไม่เกิน 5 g [8]

Tan และคณะ (2006) เปรียบเทียบผลยางธรรมชาติเหลว (LNR) และน้ำยางอีพ็อกไซด์ (LENR) ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวสำหรับอีพ็อกซีปรับปรุงความเปราะของอีพ็อกซีเรซินโดยใช้ยาง LNR เทียบกับ LENR พบว่ายาง LENR ให้สมบัติด้านความเหนียวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับยาง LNR ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของ LENR ซึ่งวงแหวนออกซิเจนในอีพ็อกซีเรซินถูกเปิดออก ปฏิกิริยาเป็น Amino alcohol เอมีนไนโตรเจนที่ยังเหลือ โดยไฮโดรเจนหนึ่งโมเลกุลจะเกิดปฏิกิริยา “Secondary amine” ทำปฏิกิริยากับอีพ็อกซีต่อทุกๆ เอมีน (NH<sub>2</sub>) ซึ่ง Primary amine ต้องใช้ Oxirane สองกลุ่มในการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ [60]

#### 2.16.4 การใช้นาโนซิลิกาเพื่อปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติ

Kothmann และคณะ (2015) ใช้นาโนซิลิกาปรับปรุงความล้าจากรอยแตกของอีพ็อกซีเรซิน โดยแปรปริมาณนาโนซิลิกาในอัตราส่วน 5, 10, 15, 20, 25 %wt ผสมร่วมกับอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งอุณหภูมิที่ในการผสมคือ 60 °C ในลำดับแรกทำการผสม MHPA และตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ากันภายใต้ความดัน 10 mbar จากนั้นเทส่วนผสมลงในเบ้าพร้อมกับสารเคลือบที่สภาวะ 60 °C นำไปอบเพื่อให้คงรูปที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 11 ชั่วโมง [61]



รูปที่ 2. 21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิต (a) 5, (b) 10 และ (c) 25%wt ของนาโนซิลิกา

จากผลการทดลองพบว่าลักษณะการกระจายตัวของนาโนซิลิกาในอีพ็อกซีเรซิน มีการกระจายตัวที่สมบูรณ์ เนื่องจากมีเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งมีส่วนในการปรับปรุงความล้าจากรอยแตกได้ โดยแปรนาโนซิลิกาตั้งแต่ 15 wt% และใส่มากที่สุด 25 wt% นาโนซิลิกาเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในเรื่องการช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกระแทก ลดการสะสมความร้อน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น (Ikeda และ Kohjiya, 1997; Kohjiya และ Ikeda, 2003) [46]

การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงมีปัญหาเนื่องจากการเกิดแนวโน้มการรวมตัวของนาโนซิลิกาสูง ไม่เกิดการกระจายตัวไปในเนื้ออย่างได้โดยง่ายเนื่องจากแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของนาโนซิลิกา และความไม่เข้ากันดังกล่าวจึงทำให้ระหว่างยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้วและอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีขั้วเกิดการแยกเฟสกัน ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ดี [62, 63] (Ikeda และ

Kameda, 2004., Sae-Oui, 2005) แก้ปัญหาโดยการเติมไซเลนร่วมเป็นสารคู่ควบ เช่น bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si-6) และ 3-thiocyanatopropyl triethoxysilane (Si-264) ผสมร่วมในคอมปาวด์ยางเพื่อปรับปรุงการเสริมแรงของนาโนซิลิกา (Murakami และคณะ 2003) [64]

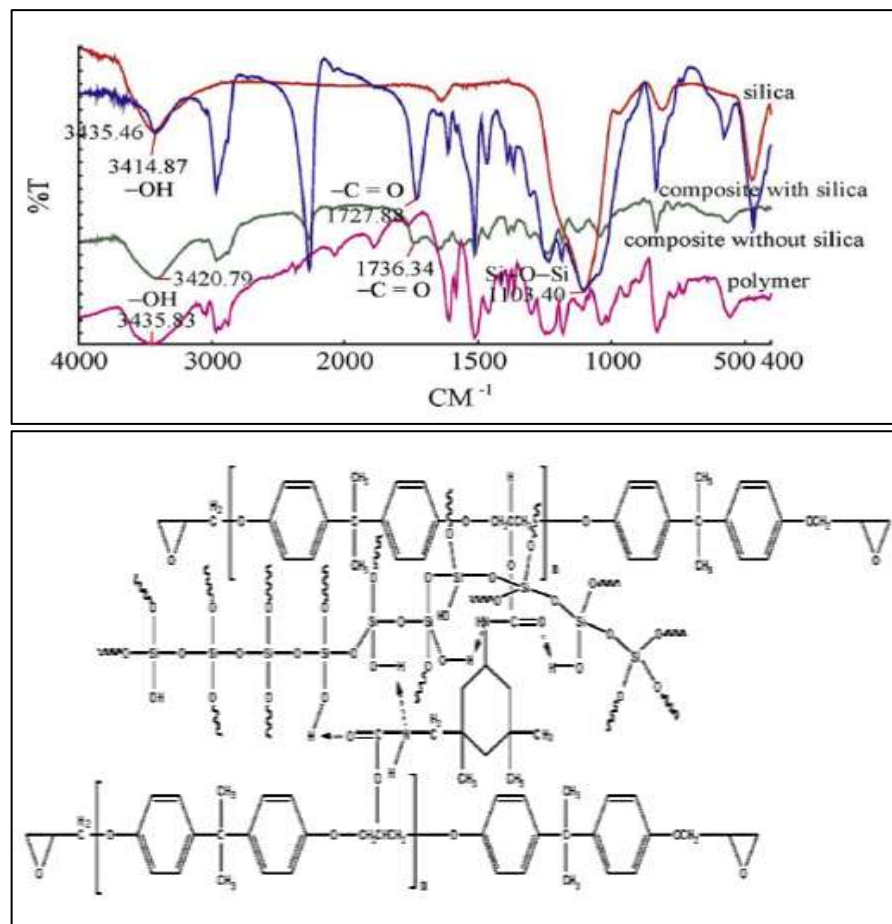
Chen และคณะ (2008) ใช้สารตัวเติมเสริมแรงในยางโดยใช้นาโนซิลิกา พบว่านาโนซิลิกามีศักยภาพในการใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติในยางธรรมชาติได้ ยางธรรมชาติเติมนาโนซิลิกา (Fume silica และ Precipitated silica nanoparticle) ลงในยางช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลบางตัวให้ดียิ่งขึ้น เนื่องด้วยนาโนซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกา เกิดการดูดซับกับวัสดุที่มีขั้วซึ่งเกิดผ่านทางพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นนาโนซิลิกาจึงสามารถเกิดการรวมกลุ่มกันเองตามธรรมชาติ Fume silica มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมกลุ่มกัน ปริมาณและขนาดของ นาโนซิลิกาที่เหมาะสม อัตราส่วนการผสม ขนาดอนุภาค สมบัติที่ต้องการต่างๆ เพิ่มขึ้นได้ การนำน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมคือนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 14 nm ซึ่งเติมที่อัตราส่วน 4 wt% โดยใช้ Self-assembly techniques ผสมกับเทคนิคการผสมน้ำยางคอมปาวด์ เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซิลิกา สามารถปรับปรุงความสมบัติต้านทานต่อความร้อน คุณสมบัติเชิงกลไดนามิก และลักษณะสัญญาณวิทยา ผลการทดลองพบว่าอนุภาคนาโนซิลิกามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 80 nm การรวมตัวขั้นต้นนี้ไม่ได้คล้ายกับการเกิดการรวมกลุ่มของซิลิกา หากแต่เกิดจากการดูดซับของสายโซ่โพลีเมอร์อย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับ NR/silica nanoparticles ความต้านทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก อุณหภูมิการเสื่อมสลายเพิ่มขึ้นถึง 12.2 °C เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ ยิ่งไปกว่านั้น Storage module และ Relaxation activation energy ของยางธรรมชาติ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Tg ลดลง [65]

Lay และคณะ (2012) ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติที่มีการผสมนาโนซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกา พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการคงรูปมีค่าสูงสุด 28 นาทีเปรียบเทียบกับ ความต้านทานต่อแรงดึงเมื่อเติมซิลิกากับนาโนซิลิกา พบว่านาโนซิลิกาเติมได้ในปริมาณที่น้อยกว่าซิลิกา ปรับปรุงสมบัติได้ 0.6-1 phr ของนาโนซิลิกา ในขณะที่ซิลิกาต้องใช้ปริมาณ 2.5 ถึง 10 phr โดยนาโนซิลิกาให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของนาโนคอมโพสิตที่สูงกว่า 35 MPa เติมนาโนซิลิกาเท่ากับ 0.6 phr ทำให้ทั้งความต้านทานต่อการฉีกขาด และระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงสุด 56 N/mm และ 1550% ตามลำดับ ส่วนดัชนีค่าการบวมน้ำของการเติมนาโนซิลิกาคือ 0.6 phr ทำให้ค่า โมดูลัสสูงสุด แต่ค่าดัชนีการบวมตัวลดลงต่ำสุด [66]

Zhang และคณะ (2008) วิเคราะห์ด้วย FTIR ในอิพอกซีเรซินซิลิกานาโนคอมโพสิต พบว่าแถบการดูดกลืนของหมู่คาร์บอกซิล (-C=O) ในอิพอกซีเรซินและซิลิกาคอมโพสิต ปรากฏที่ความถี่ค่อนข้าง

ต่ำ  $1727\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเทียบกับตัวที่ไม่ใส่ซิลิกา  $1736\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้พบความเข้มของสัญญาณยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) เคลื่อนที่จาก  $3420$  ถึง  $3414\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะพื้นฐานของการเกิดพันธะไฮโดรเจน [67]

ศึกษาพันธะไฮโดรเจนในอีพ็อกซีเรซินนาโนซิลิกาคอมโพสิต โดยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 2.22 จากกราฟจะเห็นได้ว่าแถบการดูดกลืนของหมู่คาร์บอกซิลในอีพ็อกซีเรซิน/ซิลิกาคอมโพสิตจะปรากฏที่แถบการดูดกลืนที่ต่ำกว่า  $1727\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเทียบกับตัวที่ไม่ใส่ซิลิกาที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1736\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ ยังพบว่าความเข้มของสัญญาณก็ยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในขณะที่แถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิลเคลื่อนที่จาก  $3420$  ถึง  $3414\text{ cm}^{-1}$  ทั้งหมดเหล่านี้เป็นลักษณะพื้นฐานของการเกิดพันธะไฮโดรเจนซึ่งสามารถเขียนแผนผังได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แผนผังแสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซิลิกา และพอลิเมอร์เมทริกซ์



Poompradub และคณะ (2014) ทำการสังเคราะห์ซิลิกาโดยผ่านกระบวนการ sol-gel เทคนิคเพื่อใช้กับน้ำยางพว่านาโนซิลิกามีขนาดอนุภาคเท่ากับ 13-15 nm นำมาเป็นสารตัวเติมให้กับน้ำยางสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนให้กับน้ำยาง [68]

#### 2.16.5 การใช้นาโนเซลลูโลสเพื่อปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน

กนกวรรณ มหารัชชมงคล (2014) ได้ทำการแยกเส้นใยไมโครเซลลูโลสออกจากฟางข้าวแห้งโดยการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โครงสร้างองค์ประกอบทางเคมี และสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสถูกศึกษาโดยใช้เทคนิค FTIR, XRD และ SEM แล้วนำเส้นใยมาทำการตัดแปรพื้นผิวเพื่อเพิ่มการยึดกันระหว่างเส้นใยและอีพ็อกซีเรซิน โดยนำเส้นใยเซลลูโลสที่ได้มาทำการตัดแปรพื้นผิวโดยใช้ 3-aminopropyl-triethoxy-silane (APS) และ 3-glycidoxypropyl-trimethoxy-silane (GPS) ภายใต้สภาวะต่างๆ และนำเส้นใยที่ถูกตัดแปรพื้นผิวมาผสมกับอีพ็อกซีเรซินพอลิเมอร์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเสริมแรง สมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ตัดแปรพื้นผิวที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในอีพ็อกซีพบว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวสามารถเพิ่มค่าแรงต้านการดึงได้ 29.40 % [69]

Saba และคณะ (2017) ได้ทำการแยกและศึกษาลักษณะของเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNFs) จากเยื่อกระดาษคราฟท์ ผสมในอีพ็อกซีเรซินที่ปริมาณ 0.5 0.75 และ 1%wt ศึกษาผลกระทบของการดูดกลืนรังสีของ CNF ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าการเพิ่มขึ้นของ CNFs ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีได้ดีขึ้น และการใช้ CNFs 75% แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซินได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอื่น [70]

Omran และคณะ (2008) ศึกษาผลของเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ต่อสมบัติทางกลพลวัตและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอีพ็อกซี/ไดอะมิน ทำการแปรปริมาณของนาโนเซลลูโลสชนิดไฟเบอร์ที่ปริมาณ 0.5, 2 และ 5 phr ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสสะสมและ  $T_g$  ของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยที่เติมลงไป คือเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสสะสมและ  $T_g$  มีค่าลดลง จากการศึกษา SEM พบว่ามีการกระจายตัวและการยึดติดที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์อีพ็อกซี [71]

Mihryan และคณะ (2013) ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ CNCs เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับอีพ็อกซีเรซิน หลังจากมีการปรับปรุงพื้นผิวพบว่า CNCs ไม่เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งการกระจายตัวของ CNCs ในอีพ็อกซีเรซินจะช่วยปรับปรุงพฤติกรรมเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตเป็นอย่างมาก [72]

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1. สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.1.1 สารเคมีและวัสดุ

3.1.1.1 น้ำยาธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 25 และ ENR 50) เป็นของเหลวมีปริมาณเนื้ออย่างแห้ง (DRC) 33.89 % ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ประมาณที่  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93\text{ g/cm}^3$  ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เมืองใหม่ กัดทรี จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย

3.1.1.2 อีพ็อกซีเรซินชนิด YD 535 LV ลักษณะสีขาว น้ำหนักโมเลกุล 700 g/mol ค่าความหนาแน่นประมาณ  $1.15\text{ g/cm}^3$  จาก Neotech Composite Co., Ltd.ประเทศไทย

3.1.1.3 สารคงรูป (Hardenner or polyamine resin) ชนิด Th 7255 เป็นของเหลวใสสีเหลืองทำให้เกิดการแข็งตัวของอีพ็อกซีเรซิน มีค่าความหนาแน่นประมาณ  $1.20\text{ g/cm}^3$  จาก Neotech Composite Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.1.4 นาโนซิลิกา TM - 40 colloidal silica 40 %wt มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ  $1.28\text{-}1.30\text{ g/cm}^3$  ขนาดอนุภาค 20 nm น้ำหนักโดยเฉลี่ยของนาโนซิลิกา 60.08 g/mol และมีพื้นที่ผิวประมาณ 135.9 กรัมต่อตารางเมตร จากห้างหุ้นส่วน Boss Optical Limited Partnership จำกัด ประเทศไทย

3.1.1.5 นาโนเซลลูโลส (Cellulose Nanocrystals, CNC) อนุภาคนาโนเหล่านี้ผลิตจากเยื่อไม้ยูคาลิปตัส มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ประมาณ 14,700-27,850 g/mol ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนเซลลูโลส คือ 2.3-4.5 nm มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 400 จากบริษัท CelluForce, ประเทศแคนาดา

3.1.1.5 แผ่นไฟเบอร์คาร์บอน มีลักษณะเป็นเส้นใยสีดำแบบประสาน มีการจัดเรียงตัวแบบมุม  $90^{\circ}$  มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.005-0.010 mm จากเส้นผ่าศูนย์กลาง มีค่าความหนาแน่น  $1.7\text{ g/cm}^3$  จาก Neotech Composite Co., Ltd. ประเทศไทย

### 3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ มีขนาดความยาว 9.5 นิ้ว ความกว้าง 1.2 นิ้ว เป็นพิมพ์แบบประกบตัวผู้กับตัวเมียที่ใช้ในการขึ้นรูปใบพัด

3.1.2.2 กระจก ลักษณะเป็นกระจกนิรภัยใสขนาด 1000 x 1000 mm<sup>2</sup> ความหนา 10 mm ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปขึ้นทดสอบสมบัติของวัสดุใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

3.1.2.3 เครื่อง CNC โดยเครื่อง CNC 3D มี 3 แกนแกน ขนาด 700 x 700 x 50 mm ใช้สำหรับกระบวนการตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบ

3.1.2.4 เครื่องกวนสาร ใช้สำหรับกวนผสมสารเคมีหรือสารละลายเพื่อใช้ในการขึ้นรูป

3.1.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลเป็นเครื่อง A&D Weighing SJ Portion Scales รุ่น SJ-20KHS ขนาด 20 ±0.01 kg มีความละเอียดสูงใช้ในการชั่งน้ำหนักของสารเคมีในกระบวนการต่างๆ

## 3.2 สมบัติเบื้องต้น

### 3.2.1 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

โดยการนำยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ นาโนซิลิกา และนาโนเซลลูโลส นำมาเย็นย่นสูตรโครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR และหาเปอร์เซ็นต์โมลอีพ็อกไซด์ด้วยเทคนิค <sup>1</sup>H-NMR

#### 3.2.1.1 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ นาโนซิลิกา และนาโนเซลลูโลส นำมาเย็นย่นสูตรโครงสร้างของธรรมชาติอีพ็อกไซด์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) โดยใช้ ATR Mode วิเคราะห์โดยใช้ช่วงเลขคลื่นระหว่าง 400-4000 cm<sup>-1</sup> จำนวน 256 สแกน แล้วนำมาทดสอบด้วยเครื่อง FTIR

#### 3.2.1.2 Proton Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (<sup>1</sup>H-NMR)

นำยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์มาละลายในตัวทำละลายดีวเทอเรตเตตระคลอโรฟอร์ม จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง (Proton nuclear magnetic resonance, <sup>1</sup>H-NMR) รุ่น Bruker Ultrashield Advance 400 ) จากนั้นนำสเปกตรัมที่ปรากฏ Chemical shift ที่ตำแหน่งสัญญาณ 2.70 ppm และ 5.14 ppm ซึ่งเป็นของเมทิลีนโปรตอนตำแหน่งวงแหวนอีพ็อกไซด์ และโอเลฟินิกโปรตอนตำแหน่งพันธะคู่ตามลำดับ มาคำนวณปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ตามสมการที่ 1 [65]

$$\text{Mold \% Epoxide} = \frac{A_{2.7}}{A_{2.7} + A_{5.14}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ A<sub>2.7</sub> คือ พื้นที่ใต้พีคที่สัญญาณ 2.7 ppm  
 A<sub>5.14</sub> คือ พื้นที่ใต้พีคที่สัญญาณ 5.14 ppm

### 3.2.2 วิเคราะห์ขนาดอนุภาค

การวิเคราะห์ทดสอบขนาดอนุภาคที่นิยมใช้มี 4 วิธี ได้แก่ การใช้ตะแกรง (Analytical Sieving Method) การใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscopy) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction) ซึ่งในการวิจัยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของแสงเป็นการวัดวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) เครื่องจะวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง สามารถหาได้ทั้งขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

### 3.3 ศึกษาสภาวะการผสมคอมโพสิตยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์กับอีพ็อกซีเรซิน

โดยทำการแปรชนิดยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ต่างกัน โดยทำการผสมอีพ็อกซีเรซิน 100 phe และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาคอมโพสิตยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

สูตร	ปริมาณ (phe*)				
Epoxy resin	100	100	100	100	100
ENR	0	3	5	7	10
Hardenner	35	35	35	35	35

\* ENR ==> ENR 25 และ ENR 50

โดยมีขั้นตอนในการผสมดังนี้

- 1) ผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินกวน 15 min ด้วยความเร็ว 60 rpm
- 2) ใส่ Hardener ทำการกวนต่อ 5 min กวนด้วยความเร็ว 60 rpm
- 3) เทส่วนผสมลงในเบ้ายาง ตั้งทิ้งไว้จนแข็งตัวเป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) แกะชิ้นทดสอบออกจากเบ้า

5) ศึกษาสมบัติลักษณะทางกายภาพกายภาพ (ลักษณะความโปร่งแสงความเข้ากันของสาร และปริมาณฟองอากาศในชิ้นงานความหนาแน่นความแข็งเปราะโดยการหักงอและน้ำหนัก)

### 3.4 ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขนาดนาโน

ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขนาดนาโน (Nanofiller) ที่เติมลงในคอมโพสิตยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ผสมกับอีพ็อกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต ผลจากการศึกษาในหัวข้อ 3.3 จะนำสูตรที่เลือกคือ ใช้ยาง ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phr ต่ออีพ็อกซีเรซินและสารคงรูป 100:35 มาทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส (0, 0.25, 0.75 และ 1.00 phr) และทำการผสมดังตารางที่ 3.2 แล้วนำนาโนคอมโพสิตที่ได้ทดสอบลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานาโนคอมโพสิต

สูตร	ปริมาณ (phr)				
Epoxy resin	100	100	100	100	100
ENR 50	5	5	5	5	5
Nanofiller	0	0.25	0.5	0.75	1.0
Hardenner	35	35	35	35	35

โดยมีขั้นตอนในการผสมดังนี้

1) ผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินร่วมกับนาโนซิลิกาจน 18 min ด้วยความเร็ว 60 rpm

2) ใส่ Hardener ทำการกวนต่อ 5 min กวนด้วยความเร็ว 60 rpm

3) เทส่วนผสมลงในเบ้าวาง ตั้งทิ้งไว้จนแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

4) แกะชิ้นทดสอบออกจากเบ้า

5) ศึกษาสมบัติลักษณะทางกายภาพกายภาพ (ลักษณะความโปร่งแสงความเข้ากันของสาร และปริมาณฟองอากาศในชิ้นงานความหนาแน่นความแข็งเปราะโดยการหักงอและน้ำหนัก)

### 3.5 ศึกษาอิทธิพลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต

จากการศึกษาศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขนาดนาโนที่ผสมยาง ENR 50 เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุด พบว่าการใช้นาโนซิลิกา ที่ปริมาณ 0.75 phr ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรง

กระแทกสูงที่สุด แต่ในกรณีการเติมนาโนซิลิกา พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกา ดังนั้นจึงศึกษาคอมโพสิททาง ENR 50 กับอีพ็อกซีเรซินโดยแปรปริมาณนาโนซิลิกา ที่อัตราส่วน 0-5 phe โดยแสดงดังตาราง 3.3

ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานาโนคอมโพสิทระหว่าง EP/ENR 50 และนาโนซิลิกา

สูตร	ปริมาณ (phe)				
Epoxy resin	100	100	100	100	100
ENR 50	5	5	5	5	5
Nanosilica	1	2	3	4	5
Hardenner	35	35	35	35	35

### 3.5.1 ศึกษาลักษณะรูปแบบการผสมผสมและอัตราส่วนที่เหมาะสม

#### ➤ การผสมแบบปกติ

- 1) ผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์กับอีพ็อกซีเรซินร่วมกับนาโนซิลิกาจน 18 min ด้วยความเร็ว 60 rpm
- 2) ใส่ Hardener ทำการกวนต่อ 5 min กวนด้วยความเร็ว 60 rpm
- 3) เทส่วนผสมลงในเบ้ายาง ตั้งทิ้งไว้จนแข็งตัวเป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) แกะชิ้นทดสอบออกจากเบ้า
- 5) ศึกษาสมบัติลักษณะทางกายภาพกายภาพ (ลักษณะความโปร่งแสงความเข้ากันของสารและปริมาณฟองอากาศในชิ้นงานความหนาแน่นความแข็งแรงเปราะโดยการหักงอและน้ำหนัก)

#### ➤ การผสมแบบมาสเตอร์แบท

- 1) ชั่งยาง ENR 50, Nanofiller ตามอัตราส่วน แล้วนำมาผสมด้วยเครื่องกวนด้วยความเร็ว 60 rpm เป็นเวลา 3 min
- 2) ผสมอีพ็อกซีเรซิน ผสมต่อ 15 min โดยเครื่องกวนความเร็ว 60 rpm
- 3) ผสม hardener ตามอัตราส่วนผสมต่อ 5 นาที
- 4) นำส่วนผสมเทลงเบ้า
- 5) พักทิ้งไว้จนเซตตัว 24 hr ที่อุณหภูมิห้อง แกะออกจากเบ้า ชั่งน้ำหนัก วัดโดยทำการผสมทั้งสองรูปแบบการผสมและที่อัตราส่วน 5 อัตราส่วนตามรูปแบบข้างต้นความหนา ดูระดับความขุ่นของชิ้นทดสอบโดยใช้สายตา

### 3.5.2 ศึกษาอุณหภูมิการคงรูปที่ส่งผลต่อการคงรูปลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต

นำส่วนผสมตามตารางที่ 3 มาผสมตามรูปแบบมาสเตอร์แบท โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งยาง ENR, Nanofiller ในแต่ละความเข้มข้นตามอัตราส่วนผสมด้วยความเร็ว 60 รอบ/นาาที เป็นเวลา 3 นาที
2. ผสมอีพ็อกซีเรซิน กวนต่อ 15 นาที โดยเครื่อง stirred ความเร็ว 60 รอบ/นาาที
3. ผสม hardener ตามอัตราส่วนผสมต่อ 5 นาที
4. นำส่วนผสมเทลงเบ้า
5. พักให้นาโนคอมโพสิตเซตตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 30 °C, 60 °C และ 80°C เป็นต้น
6. แกะออกจากเบ้า ชั่งน้ำหนัก วัดความหนา ดูระดับความขุ่นของชิ้นทดสอบ
7. นำไปทดสอบ บันทึกราค่า

โดยทำการเปรียบเทียบการคงรูปที่อุณหภูมิห้องและอบด้วยอุณหภูมิ 60 และ 80 °C จากนั้นศึกษาลักษณะทางกายภาพ (ลักษณะความโปร่งแสงความเข้ากันของสารและปริมาณฟองอากาศในชิ้นงานความหนาแน่นความแข็งเปราะโดยการหักงอและน้ำหนัก)

## 3.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล

### 3.6.1 ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง

การทดสอบความต้านทานแรงดึงเป็นการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ โดยใช้ชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นรูปดัมเบลชนิด I ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ขนาดชิ้นตัวอย่าง 50 x 3 มิลลิเมตร ที่มีความยาวพิกัด (Gauge length,  $L_0$ ) 40 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร วัดความกว้างและความหนาของชิ้นตัวอย่างเพื่อใช้คำนวณพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (Cross sectional area,  $A_0$ ) อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และมี Load cell 10 กิโลนิวตัน ใช้ในการทดสอบแรงดึง

### 3.6.2 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด

ชิ้นตัวอย่างมีลักษณะตาย B ตามมาตรฐาน ASTM D 624 มีความยาว 110 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตรและหนา 2.2 มิลลิเมตรใช้อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีและมี Load cell 10 กิโลนิวตัน

### 3.6.3 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกเป็นแบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D 256 ซึ่งมีหัวค้อนสำหรับเหวี่ยงลูกตุ้มเคลื่อนที่ผ่านระหว่างขาตั้งของเครื่องทั้งสองเพื่อกระแทกชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ สำหรับชิ้นทดสอบมีขนาด 63.5 x 12.7 x 3.0 มิลลิเมตรและมีรอยบากอยู่ตรงกลางของชิ้นงานเป็นรูปตัววี ทำมุม 45 องศา

### 3.6.4 ทดสอบสมบัติความแข็ง

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ชิ้นทดสอบมีลักษณะผิวเรียบ ความหนาของชิ้นงานอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร โดยจะกดไว้ประมาณ 30 วินาที ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบประมาณ 5-6 ตัวอย่าง และกดตัวอย่างละ 4-5 จุด จากนั้นอ่านค่าที่ได้จากหน้าปัดเครื่อง โดยใช้เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) แบบชอร์ ดี (Shore D) เป็นเครื่องทดสอบความแข็ง

### 3.6.5 ทดสอบความหนาแน่น

ทดสอบความหนาแน่นของสารตามมาตรฐาน ASTM D792 ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและเป็นปริมาณที่บอกค่ามวลของสารในหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สูตรการหาความหนาแน่นของวัตถุ แสดงดังสมการ 3.1

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

โดยที่ D คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M คือ มวลรวมของวัตถุ (kg)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (m<sup>3</sup>)

## 3.7 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตและนาโนคอมโพสิต ถูกทดสอบโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric analyzer (TGA) จาก METTLER TOLEDO รุ่น TGA/DSC 3+ ซึ่งการทดสอบทำโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิ 30 °C จนถึงอุณหภูมิ 1000 °C มีอัตราการให้



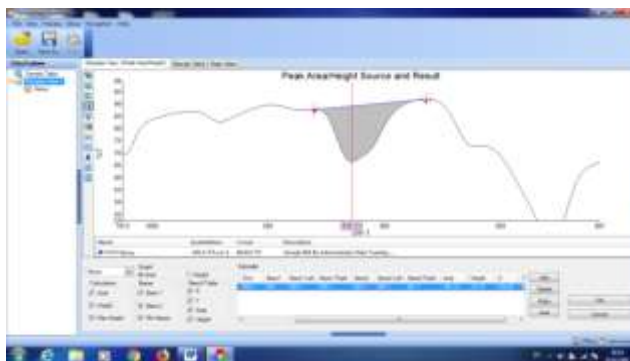
ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะของก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน ในการทดสอบแต่ละครั้งขึ้น ตัวอย่างต้องมีน้ำหนักระหว่าง 5–10 mg

### 3.8 ศึกษาความเข้ากันได้ของคอมโพลีท

ความเข้ากันได้ของคอมโพลีทจากยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน ศึกษาโดยเทคนิค FTIR และลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และ SEM-EDX

#### 3.8.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์ FTIR หรือ Fourier transform infrared spectra measurements เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของตัวอย่าง การวิเคราะห์ทำโดยใช้ Perkin-Elmer spectrometer Spectrum Two FTIR Spectrometer (FTIR, Spectrum Two, Perkin-Elmer, USA) ในโหมด UATR เพื่อหาแถบสเปกตรัม IR ตัวอย่างอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และอีพ็อกซีเรซิน ผสมยาง ENR 50 กับนาโนซิลิกาที่เตรียมขึ้น โดยเก็บข้อมูลที่ช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 4000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งใช้จำนวนการสแกน 32 ครั้งต่อเปกตรัม ความละเอียด 2  $\text{cm}^{-1}$  ทั้งนี้ยังสามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของพีคต่างๆ เพื่อใช้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยโปรแกรม FTIR

ทั้งนี้ยังสามารถดูการเกิดปฏิกิริยาได้ระหว่างสารผสมโดยดูจากอัตราส่วนความเข้มของพีค ใช้บอกถึงอัตราส่วนความเข้มของพีคของหมู่นั้นว่ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการคำนวณหาอัตราส่วนความเข้มของพีค จะใช้ค่าแทนสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราส่วนความเข้มของพีค} = \text{พีคที่มีการเปลี่ยนแปลง/พีคอ้างอิง} \quad (3.2)$$

### 3.8.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) โดยการนำชิ้นทดสอบหลังจากทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่หักแล้วมาตัดให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ แล้วนำมาติดกับ Stab แล้วทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทอง ก่อนทำการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

### 3.9 ศึกษาความต้านทานต่อสภาวะการใช้งานของวัสดุนาโนคอมโพสิต

ทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อม ตามมาตรฐาน ASTM G154 การทดสอบโดยเครื่องเร่งสภาวะ (Accelerated Weathering) ชิ้นทดสอบจะได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 313 nm ความเข้มแสง 1.55 W/m<sup>2</sup> ควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 60 °C ส่วนช่วงไอน้ำควบแน่นควบคุมอุณหภูมิ 50 °C และทำการสเปรย์น้ำ 15 min ทั้งนี้ชิ้นทดสอบต้องไม่หนาเกิน 20 mm หลังการทดสอบทำการตรวจลักษณะภายนอก เช่น การแตก การเปลี่ยนสีของชิ้นงาน ความมันวาว การเปลี่ยนแปลงของสี และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (ความต้านแรงตึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก) และทดสอบสมบัติทางความร้อน เป็นต้น

ตอนที่ 1 ศึกษาชนิดของแสง UV ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานของนาโนคอมโพสิต

- ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G154 Cycle I โดยชิ้นตัวอย่างจะได้รับแสง UV-A ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนช่วงไอน้ำควบแน่นควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการสเปรย์น้ำ 15 นาที
- ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G154 Cycle VI โดยชิ้นตัวอย่างจะได้รับแสง UV-B ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการสเปรย์น้ำ 15 นาที และควบแน่นควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลา 0-504 ชั่วโมง ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานของนาโนคอมโพสิต

นำชิ้นตัวอย่างนาโนคอมโพสิตให้แสง UV-B ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการสเปรย์น้ำ 15 นาที และควบแน่นควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยทำการแปรเวลาในการทดสอบ 0-504 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานตึงและทดสอบความแข็ง

### 3.10 ศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปและการใช้งาน

การขึ้นรูปไบพัตโตรน ทำการขึ้นรูปโดยใช้สูตรที่ได้ทำการปรับปรุงในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งเลือกสูตรนาโนคอมโพสิทอ์ฟ็อกซีเรซิน ซึ่งให้ความต้านทานต่อกระแสที่สูงสุดมาขึ้นรูปพร้อมกับคาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบ Hand lay-up

3.10.1 ออกแบบโมลไบพัตโตรนขนาด  $21 \times 2.3 \times 1$  cm ซึ่งมีขั้นตอนในการทำดังนี้

- 1) ตัดฟิวเจอร์บอร์ดให้มีขนาดดังต่อไปนี้
  - ขนาด กว้าง 4 cm ยาว 25 cm 3 ชั้น
  - ขนาด กว้าง 4 cm ยาว 4 cm 2 ชั้น
- 2) ทา TR 104 High Temp Release Wax ลงบนไบพัตตันแบบและฟิวเจอร์บอร์ดที่ได้ตัดไว้ทุกชิ้น ทิ้งไว้สักครู่ จากนั้นนำผ้าแห้งสะอาดมาขัดที่ผิวที่ได้ลงแว็กไว้ ขัดจนผิวมีความลื่น ขึ้นเงา
- 3) ทำข้อ 2) ซ้ำทั้งหมด 3 รอบ
- 4) จากนั้นนำไบพัตตันแบบวางบนฟิวเจอร์บอร์ดขนาดกว้าง 4 cm ยาว 25 cm โดยวางให้ไบพัตอยู่บริเวณตรงกลางฟิวเจอร์บอร์ด
- 5) นำดินน้ำมันมาทำการปั้นแบบ ดังรูปที่ 3.4
- 6) เมื่อปั้นแบบเสร็จแล้ว นำฟิวเจอร์บอร์ดที่ตัดไว้ตอนต้นมาขึ้นเป็นแบบเพื่อทำการหล่อไบพัต
- 7) เก็บผิวดินน้ำมันให้เรียบเนียน จากนั้นสร้างรูปร่างสำหรับประกบแม่พิมพ์บริเวณมุมทั้ง 4 มุมของผิวดินน้ำมัน
- 8) ทา PVA น้ำยากันติดแบบลงบนผิวไบพัตและดินน้ำมันให้ทั่ว ทิ้งไว้ให้แห้ง
- 9) ผสมเจลโค้ทกับน้ำยาทำแข็ง ในอัตราส่วน เจลโค้ท 0.1 kg: น้ำยาทำแข็ง M-60 0.01 kg เมื่อได้อัตราส่วนแล้วทำการผสมให้เข้ากัน
- 10) นำเจลโค้ทที่ได้ผสมเรียบร้อยแล้วทาลงบนผิวไบพัตและดินน้ำมันให้ทั่วบริเวณ เมื่อทาเสร็จแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง 45 นาที
- 11) ทำขั้นตอนในข้อที่ 10 ซ้ำอีก 2 รอบ
- 12) ทำการผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารคงรูปในอัตราส่วน 100: 35 คนส่วนผสมให้เข้ากัน
- 13) นำทรายที่ผึ่งไว้จนแห้งผสมกับอีพ็อกซีเรซิน โดยจะเติมทรายเข้าไปเรื่อยๆจนกว่าจะมีลักษณะที่เหนียวหนืดมากขึ้น
- 14) เทส่วนผสมลงบนแบบที่เตรียมไว้ พักทิ้งไว้ให้ตัวเป็นเวลา 5-6 ชั่วโมง
- 15) นำฟิวเจอร์บอร์ดแบบและดินน้ำมันออก โดยยังไม่ต้องนำไบพัตตันแบบออก
- 16) นำฟิวเจอร์บอร์ดมาขึ้นแบบดังเดิมเพื่อทำแม่พิมพ์ไบพัตอีก 1 ผัง ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนข้อที่ 8 ถึงข้อที่ 15 จะได้แม่พิมพ์ไบพัตออกมา

### 3.10.2 การขึ้นรูปไบพัตโดรน

- 1) ตัดกระดาษแข็งตามรูปทรงของไบพัต เพื่อเป็นแบบในการตัดคาร์บอนไฟเบอร์
- 2) ตัดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้ได้ขนาดเท่าไบพัตโมลบนและล่าง จำนวน 4 แผ่น
- 3) ทา PVA ลงบนแม่พิมพ์ไบพัตและรองจนแห้ง
- 4) ผสมอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์
- 5) ทาส่วนผสมที่เตรียมไว้ลงบนแม่พิมพ์ไบพัตให้เต็มแม่พิมพ์
- 6) วางแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เรียงซ้อนทับกัน
- 7) ทาส่วนผสมที่เตรียมไว้ลงบนคาร์บอนไฟเบอร์และนำมิดโปกวพลาสติก เคลือบส่วนผสมให้กระจายทั่วไบพัต
- 8) แบ่งอีพ็อกซีเรซินที่ได้ผสมไว้ก่อนหน้านี้ จากนั้นนำผงเบามาผสมจนมีลักษณะเหนียวข้น จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงถุงพลาสติก โดยใส่บริเวณมุมของถุงเตรียมไว้ จากนั้นนำมาบีบลงบริเวณขอบของไบพัต
- 9) นำโมลประกบโดยยึดด้วยที่ยึด นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 10) นำแม่พิมพ์ออกมาจากตู้อบ ทิ้งไว้จนแม่พิมพ์เย็น จากนั้นแกะแม่พิมพ์ออก
- 11) ตกแต่งไบพัต

### 3.10.3 ทดสอบสมบัติของคอมโพสิตที่ขึ้นรูปไบพัต UAV

#### 3.10.3.1 ทดสอบสมบัติการกระแทก (Impact strength)

การทดสอบความทนแรงกระแทกภายใต้แรงที่มากกระทำ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ Izod impact strength ชิ้นงานจะเป็นแท่งยาว มีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V ขนาดของชิ้นตัวอย่าง 6.3 × 12.5 × 3 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 256

#### 3.10.3.2 ทดสอบสมบัติแรงดัดงอ (Flexural strength)

เตรียมขนาดชิ้นทดสอบ 127×12.5×3 mm ตามมาตรฐาน ASTM D 790 เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการดัดงอและมอดูลัสการดัดงอด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ที่ใช้อัตราเร็ว 1.2 mm/min (Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5K) ประเทศอิตาลี

#### 3.10.3.3 ทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness)

การวัดความแข็งของอีพ็อกซีเรซินที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมักจะ ทดสอบความแข็งที่มีหน่วย Barcol ชิ้นงานเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D 2583 จากนั้นทำการทดสอบโดยวางชิ้นทดสอบภายใต้หัวกดของเครื่องทดสอบความแข็ง Barcol และให้แรงกดที่สม่ำเสมอกับชิ้นซึ่งค่าที่ได้จะถูกแปลงเป็นค่าความแข็งที่มีหน่วยเป็น Barcol

### 3.10.4 การสร้างการจำลองการทำงานของใบพัดในโปรแกรม Ansys

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีการศึกษาการสร้างการจำลองการทำงานของใบพัดในโปรแกรม Ansys ซึ่งมีขั้นตอนการทำดังต่อไปนี้ โดยได้แสดงการสร้างการจำลองเหตุการณ์อย่างละเอียดจะอยู่ในภาคผนวก ก

1. เข้าโปรแกรม Ansys โหมด Fluid flow (fluent)
2. Import Geometry
3. คลิกขวา Geometry >> Edit Geometry in Design Modeler
4. สร้าง Rotating body ครอบใบพัด
5. สร้าง Enclosure สำหรับ propeller domain
6. สร้าง Rotating body และ Enclosure สำหรับ propeller domain
7. สำหรับ Rotating Body >> Tool >> Enclosure >> ตั้งค่าตามรูป (เปลี่ยนแปลงได้ตามใบพัด)
8. สำหรับ Enclosure Propeller domain >> Tool >> Enclosure >> ตั้งค่าตามรูป (เปลี่ยนแปลงได้ตามใบพัด)
9. Boolean >> Subtract >> Target Bodies เป็น Rotating body >> Tool Bodies เป็น propeller
10. เข้าสู่ Mesh >> คลิก Mesh >> คลิก Mesh Control >> คลิก Sizing เพื่อกำหนดความละเอียดของใบพัด
11. ตั้งค่า Name selection
12. Generate Mesh
13. Set up
14. Run simulation

### 3.11 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของคอมโพลีโทอีพ็อกซีเรซิน

#### 3.11.1 ค่าเวลาความเป็นเจลของอีพ็อกซีเรซิน (Gelation Time)

ค่าเวลาความเป็นเจลเป็นระยะเวลาที่เรซินเปลี่ยนจากของเหลวที่ไหลตัวได้ไปสู่สภาพที่เป็นเจล ซึ่งไม่สามารถไหลตัวได้ การทดสอบทำโดยนำอีพ็อกซีเรซินมาจำนวนหนึ่ง เติมตีวเร่งปฏิกิริยาลง จากนั้นคนส่วนผสมที่ได้แล้วทำการจับเวลาจนกระทั่งอีพ็อกซีเรซินเจล ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM

D2471-99 โดยวิธีการทดสอบนี้ใช้ในการตรวจสอบค่าเวลาความเป็นเจลของอีพ็อกซีเรซินเพื่อติดตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป

### 3.11.2 Setting time or Cure time

Setting time คือช่วงที่อีพ็อกซีเรซินแข็งตัวเต็มที่และเป็นช่วงที่อีพ็อกซีเรซินเย็นตัวลงหลังจากที่มีความร้อนสูงในขณะทำปฏิกิริยา โดยมีวิธีในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3532 โดยนำอีพ็อกซีเรซินมาจำนวนหนึ่งเติมตัวเร่งปฏิกิริยา คนส่วนผสมที่ได้แล้วทำการวัดอุณหภูมิหลังจากอีพ็อกซีเรซิน เริ่มทำปฏิกิริยาจนกระทั่งอุณหภูมิในระบบมีค่าคงที่

## บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### Part I: ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

##### 4.1.1 ลักษณะเฉพาะ

ลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 25, ENR 50) และสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคนาโน (นาโนซิลิกา นาโนเซลลูโลส) ในนาโนคอมโพสิตแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดิบ

ส่วนประกอบ	โครงสร้างทางเคมี	ความหนาแน่น ( $\text{gcm}^{-3}$ )	หมู่ฟังก์ชัน
ยางธรรมชาติ	$(\text{C}_5\text{H}_8)_n$	0.98	มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างหลัก
ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์	$(\text{C}_5\text{H}_8\text{O})_n$	0.93	ดัดแปรโครงสร้างจากยางธรรมชาติ
อีพ็อกซีเรซิน	$(\text{C}_{39}\text{H}_{45}\text{O}_7)_n$	1.15	มีหมู่แทนที่ 2 หมู่
สารคงรูป	$(\text{C}_4\text{H}_{13}\text{N}_3)_n$	1.2	สารที่ใช้ในการคงรูป
นาโนซิลิกา	$(\text{SiO}_2)_n$	1.28-1.30	สารตัวเติมขนาดนาโนเมตร
นาโนเซลลูโลส	$[(\text{C}_6\text{O}_3\text{H}_{10})_{22-28}\text{SO}_3\text{Na}]_{4-6}$	1.5	สารตัวเติมขนาดนาโนเมตร

ตารางที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

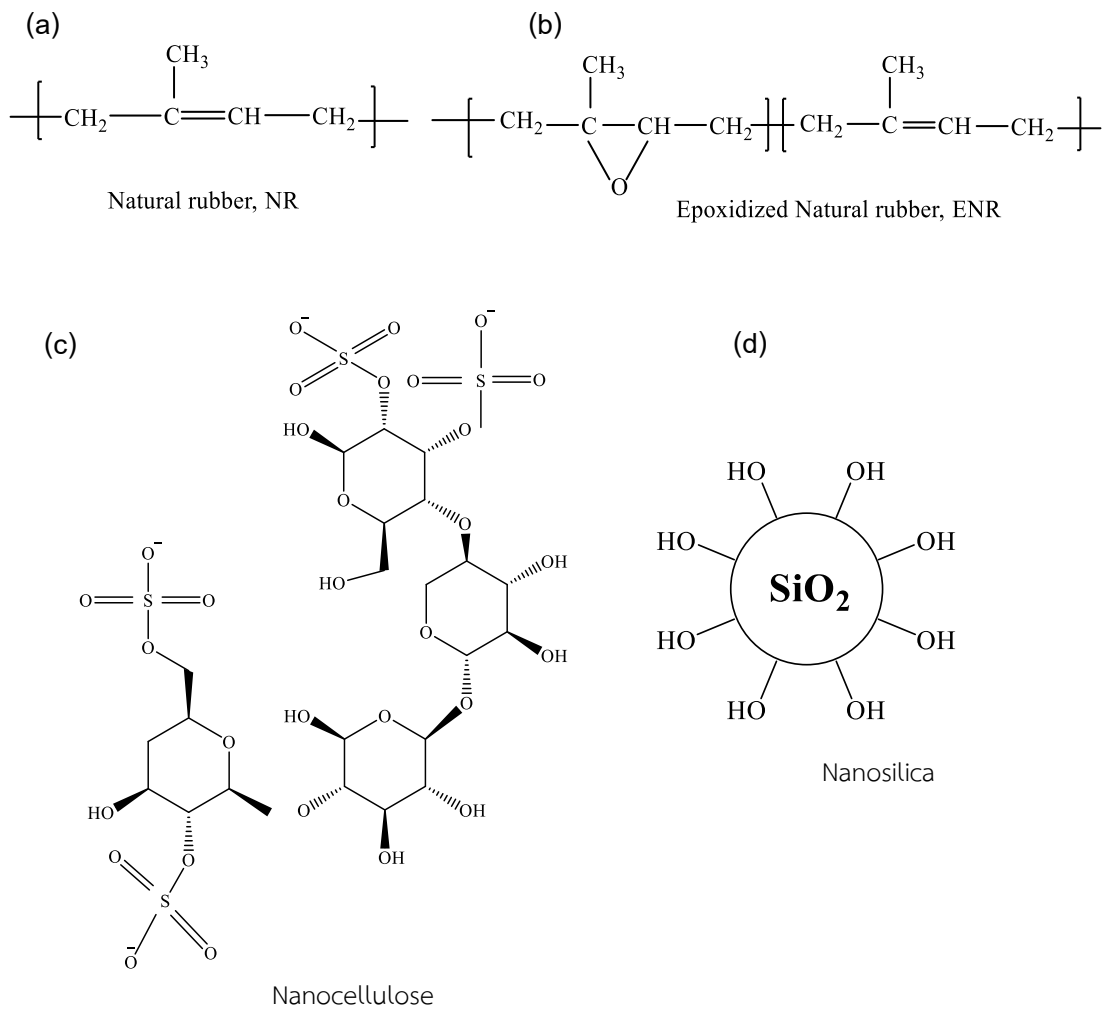
ลักษณะเฉพาะ	นาโนเซลลูโลส	นาโนซิลิกา	ENR 25	ENR 50
ขนาดอนุภาค (nm)	20.3	50	1,200	1,600
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	14,700-27850	60.08	152.33	152.33
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	400	135		
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.5	1.28-1.30	0.93	0.93
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีขาวขุ่น	คอลลอยด์ 40% ในน้ำ	คอลลอยด์	คอลลอยด์

#### 4.1.2 โครงสร้างทางเคมี

สูตรโครงสร้างของยาง ENR 25 ENR 50 นาโนซิลิกา และนาโนเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ คือ cis-1, 4-polyisoprenic unit กล่าวคือ มีไอโซพรีน (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 ซึ่งมีพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C=C) อยู่ทุกหน่วยซ้ำ และมีแอลลิคคาร์บอน (allylic carbon) ซึ่งเป็นตำแหน่งคาร์บอนที่อยู่ถัดจากพันธะคู่อยู่จำนวนมาก ดังรูปที่ 4.1 (a) [73] ดังนั้นจึงสามารถนำยางธรรมชาติไปดัดแปรโมเลกุลได้ 2 แบบ ตามชนิดของการเกิดปฏิกิริยา คือ ชนิดที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาแบบเติม (addition reaction) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนและชนิดที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ (substitution reaction) ที่ตำแหน่งแอลลิคคาร์บอน นอกจากที่กล่าวมาแล้ว การดัดแปรยางธรรมชาติด้วยวิธีอีพอกซิเดชันนั้นเป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นการเติมอะตอมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ (epoxide ring) รูปที่ 4.1 (b) [74] การมีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized NR; ENR) ทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้น มีความต้านทานต่อน้ำมัน สารละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง โอโซน และการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) ได้ดี ซิลิกอนออกไซด์หรือนาโนซิลิกาสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น โดยมีลักษณะโครงสร้างเครือข่ายสามมิติมีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ มีสูตรทางเคมีคือ O=Si=O ดังรูปที่ 4.1 (d) นาโนซิลิกาจะอยู่ในรูปของผลึกและมักอยู่ในรูปแบบของควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างทางกายภาพของนาโนซิลิกาแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ ผลึก (crystalline) อสัณฐาน (amorphous) และอสัณฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous) ซึ่งในงานวิจัยจะเลือกใช้นาโนซิลิกาที่อยู่ในรูปแบบผลึก [75]



และรูปที่ 4.1 (c) แสดงโครงสร้างของนาโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากกลูโคสประมาณ 50,000 โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว แต่ละสายของสายของเซลลูโลสเรียงขนานกันไป มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย

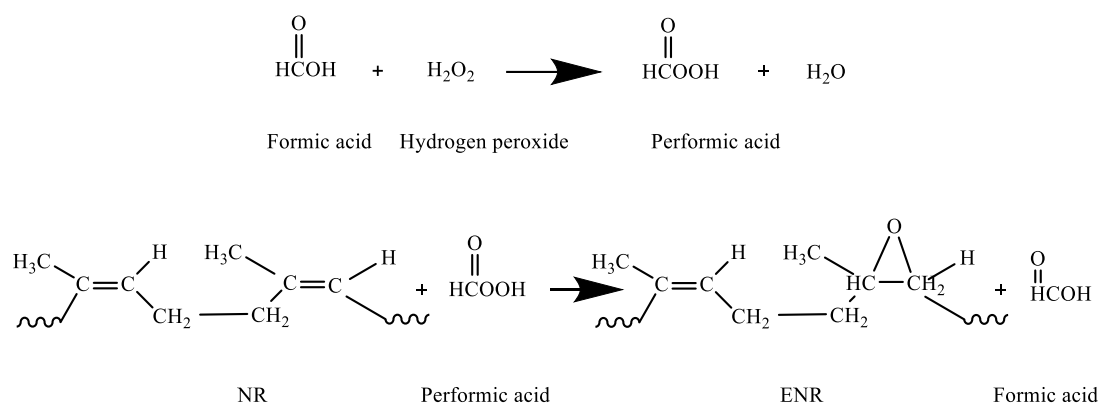


รูปที่ 4.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (c) นาโนเซลลูโลส และ (d) นาโนซิลิกา

#### 4.1.3 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

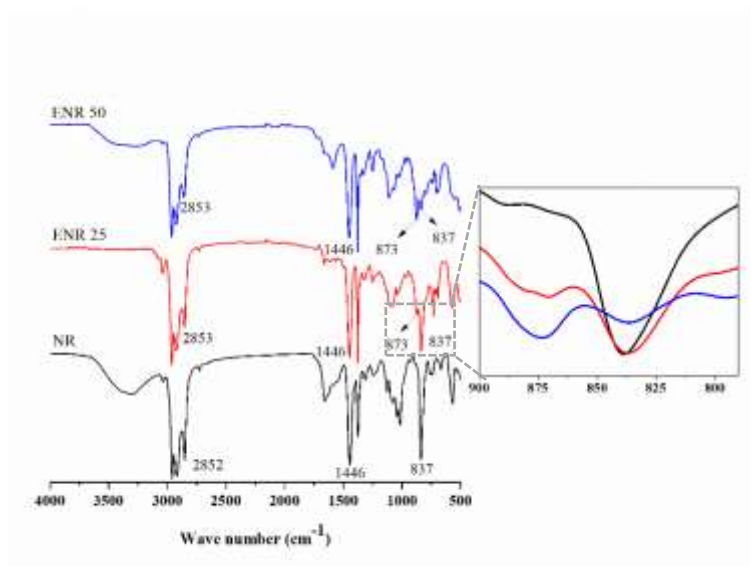
##### 1) ยืนยันสูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR

ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่ได้จากบริษัท เมืองใหม่กัตรี จำกัด นำมายืนยันสูตรโครงสร้างของธรรมชาติอีพ็อกไซด์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) โดยใช้ ATR Mode วิเคราะห์โดยใช้ช่วงเลขคลื่นระหว่าง 400-4000  $\text{cm}^{-1}$  จำนวน 256 สแกน น้ำยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์สามารถเตรียมได้โดยทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาการเกิดยาง ENR ผ่านปฏิกิริยาเปอร์ฟอร์มิกซีโอพ็อกไซด์

ผลจากการวิเคราะห์ FTIR แสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 4.3 พบว่ายางธรรมชาติที่มีโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) ปรากฏลักษณะเฉพาะของคาร์บอนพันธะคู่ (C=C) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835  $\text{cm}^{-1}$  และการสั่นยืดของหมู่เมทิล (-CH<sub>3</sub>) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2960  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับโครงสร้างของ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน เมื่อเปรียบเทียบ FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์พบว่า มีพิกที่ปรากฏเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 873  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นยืดแบบไม่สมมาตรของ C-O-C และ 1247  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นยืดแบบสมมาตรของ C-O-C เป็นการสั่นยืดแบบไม่สมมาตร ซึ่งพิกนี้ไม่ปรากฏในตัวอย่งยางธรรมชาติ จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้าง cis-1,4-polyisoprene หลังจากเกิดปฏิกิริยาอีพ็อกไซด์จะเกิดหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่ในโครงสร้างที่บริเวณตำแหน่งคาร์บอนพันธะคู่ (C=C) โดยหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์

หมู่ฟังก์ชัน	ยางธรรมชาติ	ยาง ENR
C=C-H	838	837
-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub>	1446, 1375	1449, 1375
C=C	1660	1588
-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub>	2960, 2910, 2858	2962, 2924, 2858
C-O	-	873, 1251

## 2) ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ด้วยเทคนิค <sup>1</sup>H-NMR

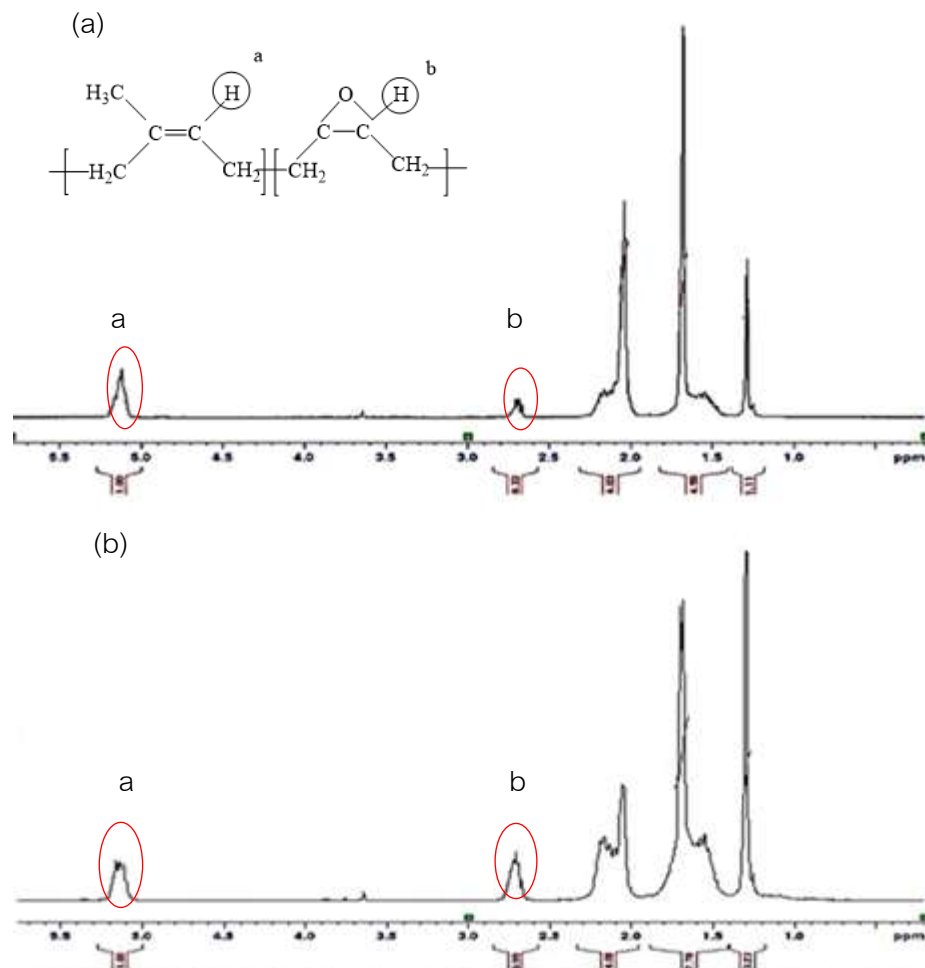
นำยาง ENR มาละลายในตัวทำละลายดีวเทอเรตเตตระคลอโรฟอร์ม แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง (Proton nuclear magnetic resonance, <sup>1</sup>H-NMR) จากนั้นนำสเปกตรัมที่ปรากฏ Chemical shift ที่ตำแหน่งสัญญาณ 2.70 ppm และ 5.14 ppm ซึ่งเป็นของเมทีนโปรตอนที่ตำแหน่งวงแหวนอีพอกไซด์ และโอเลฟินิกโปรตอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ตามลำดับ มาคำนวณปริมาณหมู่อีพอกไซด์ตามสมการที่ 1 [76] ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4 สเปกตรัมของยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ (ENR 25, ENR 50) ปรากฏสัญญาณ Chemical shift ที่ตำแหน่ง 2.7 และ 5.14 ppm ซึ่งเป็น

สัญญาณของเมทีนโปรตอนที่ตำแหน่ง a และโอเลฟินิกโปรตอนที่ตำแหน่ง b ตามลำดับ ค่า Chemical shift ของโปรตอนของหมู่ต่างๆ ใน ENR แสดงรูปที่ 4 และนำพื้นที่ใต้พีคคำนวณหาค่าโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ได้เท่ากับ 24.81% และ 49.75%

$$\text{Mole \% Epoxide} = \frac{A_{2.7}}{A_{2.7} + A_{5.14}} \quad (1)$$

โดยที่  $A_{2.7}$  คือ พื้นที่ใต้พีคที่สัญญาณ 2.7 ppm

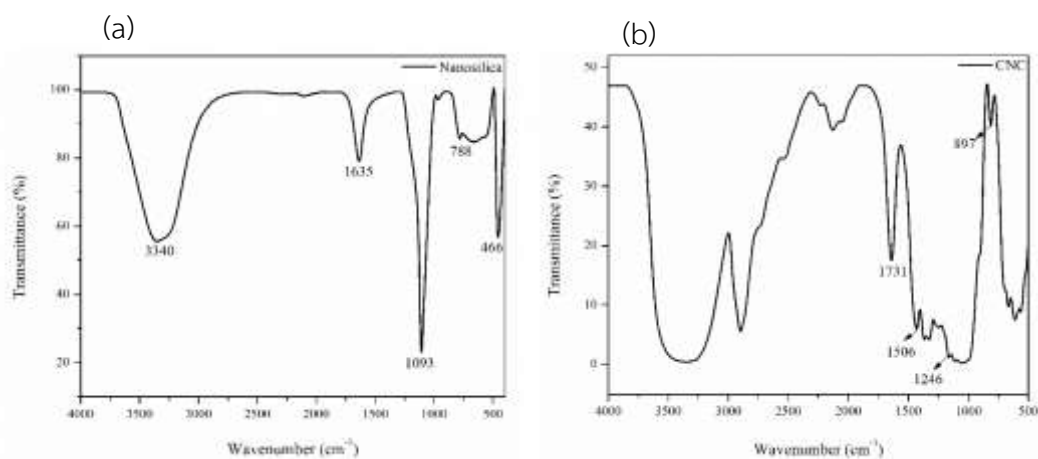
$A_{5.14}$  คือ พื้นที่ใต้พีคที่สัญญาณ 5.14 ppm



รูปที่ 4.4  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (a) ENR 25 และ (b) ENR 50

#### 4.1.4 โครงสร้างทางเคมีของนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส

ผลจากการวิเคราะห์ FTIR แสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 4.5 (a) พบว่านาโนซิลิกาที่มีโครงสร้างทางเคมี คือ ซิลิกอนออกไซด์โดยปรากฏลักษณะเฉพาะของ siloxane (Si-O-Si) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $466\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นยืดแบบไม่สมมาตรของพันธะ Si-O ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับโครงสร้างของซิลิกา นอกจากนี้ยังปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3340\text{ cm}^{-1}$  และ  $1635\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นยืด H-O-H ของน้ำที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของซิลิกาสอดคล้องกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) [77]



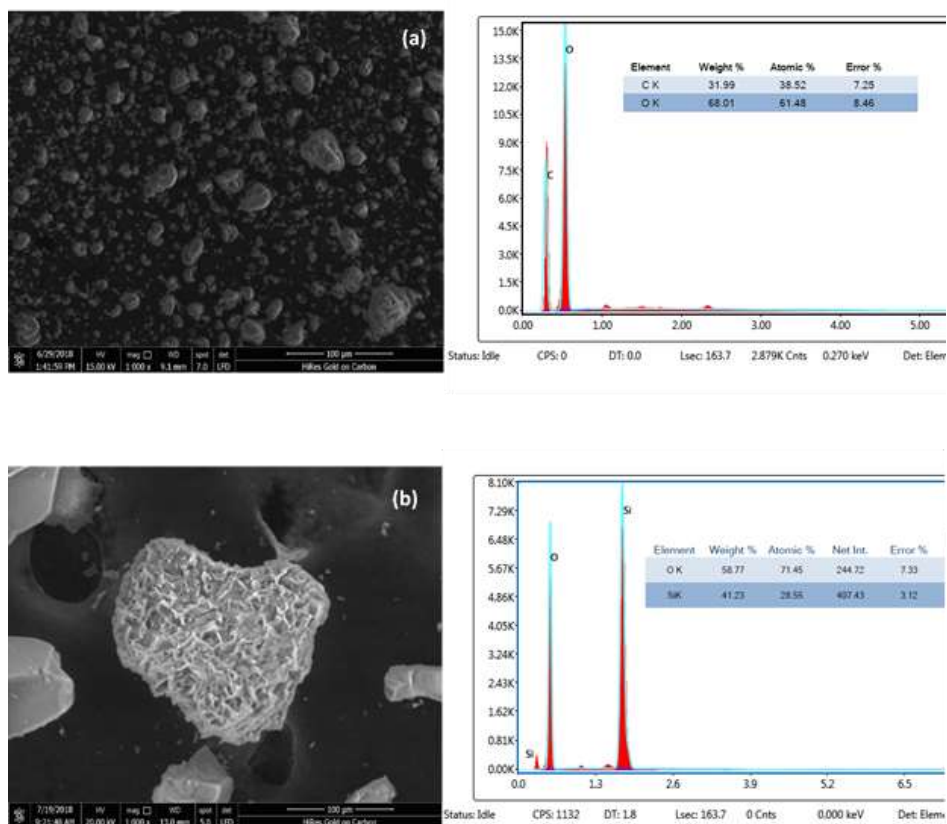
รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของสารตัวเติม (a) นาโนซิลิกา (b) นาโนเซลลูโลส

รูปที่ 4.5 (b) FTIR สเปกตรัมของนาโนเซลลูโลส ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $1731\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นยืดของ  $\text{-C=O}$  ในกรดคาร์บอกซิลิกหรือหมู่เอสเทอร์ ลักษณะเฉพาะของคาร์บอนพันธะคู่ ( $\text{C=C}$ ) ของวงแหวนอะโรมาติกในลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $1506\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นยืดของ C-O ในเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1246\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $897\text{ cm}^{-1}$  ที่บ่งบอกถึงการเชื่อมโยงของ C-O-C glycosidic ระหว่างหน่วยกลูโคสในเซลลูโลส และที่ประมาณ  $3440\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นยืด H-O-H ของน้ำที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของนาโนเซลลูโลส [78] โดยหมู่ฟังก์ชันของนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของนาโนเซลลูโลสและนาโนซิลิกา

Functional groups	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	
	Nanocellulose	Nanosilica
C=O stretching	1730	-
C-O stretching vibration of hemicellulose	1246	-
C=C stretching of aromatic ring in lignin	1506	-
C-O-C glycosidic linkages between glucose units in cellulose	897	-
H-O-H stretching mode of the absorbed water	3400	3340, 1645
Si-O-Si asymmetric bond (Si-O)	-	1093
Si-O-Si asymmetric bond (Si-OH)	-	788
Si-O-Si bond bending vibration (Si-O-Si, siloxane)	-	466

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของนาโนเซลลูโลสและนาโนซิลิกายืนยันผลด้วยเทคนิค SEM/EDX แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยรูปที่ 4.6 (a) พบองค์ประกอบของนาโนเซลลูโลส ได้แก่อะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน ดังที่แสดงในตารางเปอร์เซ็นต์ของมวลคาร์บอนคือ 31.99% และออกซิเจน 6.01% ตามลำดับ และรูปที่ 4.6 (b) แสดงนาโนซิลิกา พบองค์ประกอบธาตุ ได้แก่ ออกซิเจนและซิลิคอน ตามที่แสดงในตารางเปอร์เซ็นต์มวลของออกซิเจนคือ 58.77% และซิลิคอน 41.23% ตามลำดับ

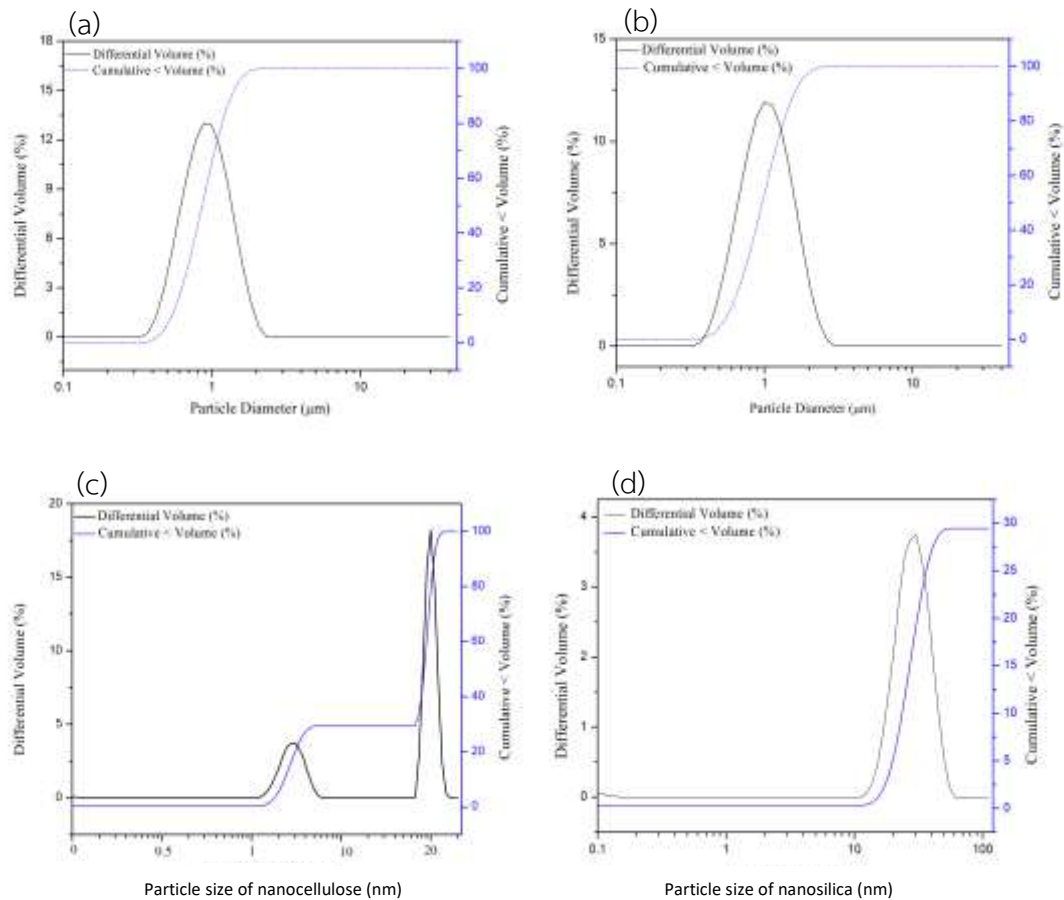


รูปที่ 4.6 EDX spectra ของสารตัวเติม (a) นาโนเซลลูโลส และ (b) นาโนซิลิกา

#### 4.2 วิเคราะห์ขนาดอนุภาค

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคในเนื้อวัสดุเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารเอง สำหรับสารเคมีขนาดและการกระจายตัวมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยเมื่อเปรียบเทียบสารชนิดเดียวกัน มวลหรือน้ำหนักเท่ากัน และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน สารที่มีขนาดเล็กจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่า เป็นผลให้พื้นที่ผิวโดยรวมของสารมากกว่า จึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงกว่า การวิเคราะห์ทดสอบอนุภาคที่นิยมใช้มี 4 วิธี ได้แก่ การใช้ตะแกรง (Analytical Sieving Method) การใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscopy) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction) ซึ่งในการวิจัยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.5 ในการหาขนาดอนุภาคทางธรรมชาติออฟอ็อคไซด์ดังรูปที่ 4.7 (a-b) พบว่า

ธรรมชาติอิพ็อกไซด์มีขนาดอนุภาคประมาณ  $1.2 \mu\text{m}$  และ  $1.6 \mu\text{m}$  จะเห็นได้ว่ายาง ENR 50 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ENR 50 อาจเนื่องมาจากความเป็นขั้วที่สูงกว่า จึงส่งผลให้โมเลกุลเกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้ยาง ENR 50 มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ในกรณีของสารตัวเติมนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส พบว่ามีขนาดอนุภาค  $50 \text{ nm}$  และ  $20.3 \text{ nm}$  ตามลำดับ



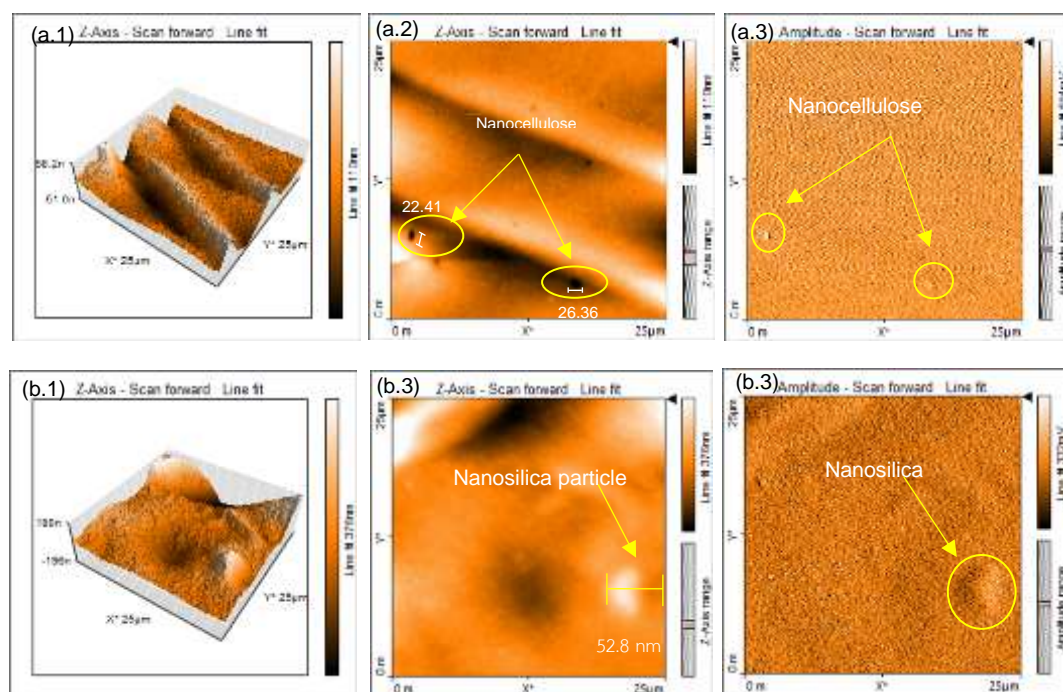
รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางธรรมชาติอิพ็อกไซด์ (c) นาโนเซลลูโลส และ (d) นาโนซิลิกา



ตารางที่ 4.5 ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส

Differential Volume (%)	Particle size (nm)			
	ENR 25	ENR 50	Nanocellulose	Nanosilica
10	500	600	1.4	20
50	800	1,000	16	35
90	1,200	1,600	20.3	50

ซึ่งขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลสยังสามารถยืนยันผลด้วยเทคนิค AFM แสดงดังรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.8 (a1) และ (b1) แสดงภาพ 3 มิติและการแยกเฟสของ (phase separate) ของนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 17.9 (15.4, 20.34) nm และ 52.8 nm ตามลำดับ



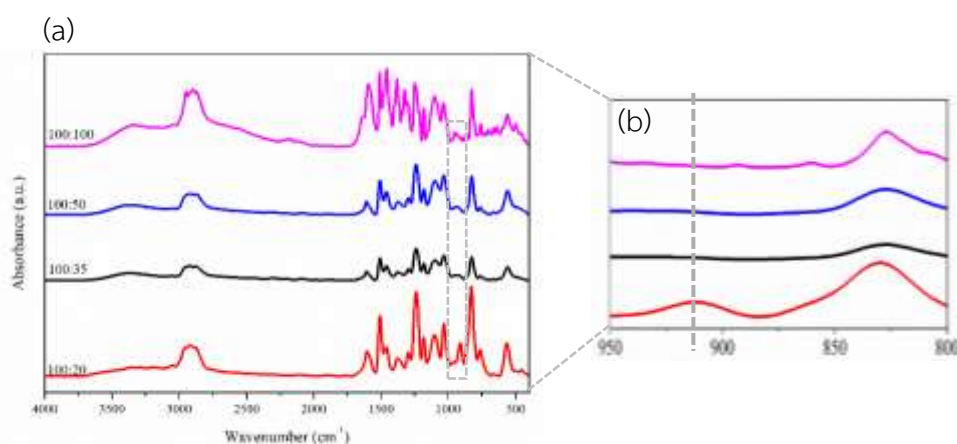
รูปที่ 4.8 ขนาดอนุภาคของ (a) นาโนเซลลูโลส และ (b) นาโนซิลิกา ; (1) รูปภาพ 3-D, (2) เฟส 2-D ของอนุภาคระดับนาโน และ (3) การแยกเฟส ของอนุภาคระดับนาโน

## Part II: คอมโพลิทอ็อกซีเรซิน

### 4.1 ศึกษาเวลาและลักษณะการคงรูป

#### 4.1.1 อัตราส่วนของอีพ็อกซีเรซินและสารคงรูป

เมื่อนำอีพ็อกซีเรซิน 100 phe ผสมกับยาง 5 phe ENR 50 และแปรปริมาณฮาร์ดเดนเนอร์ ที่ 20, 35, 50 และ 100 phe ซึ่งวงแหวนออกซิเรนในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 จะเกิดการแตกออกแล้วทำปฏิกิริยาหมู่เอมีนของฮาร์ดเดนเนอร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์และยืนยันผล โดยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.9 พบว่าพีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของอีพ็อกซีเรซินคือวงแหวนออกซิเรน (C-O-C) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $915\text{ cm}^{-1}$  [79] และจะปรากฏพีคที่สองตรงตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $2963\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการยืดของหมู่เมทิลีน (C-H) ในวงแหวนอีพ็อกซี โดยในงานวิจัยทำการ คำนวณหาค่าอัตราส่วนของความเข้มพีค (intensity ratio) โดยเทียบค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $915$  และ  $2963\text{ cm}^{-1}$  พบว่าอัตราส่วนของความเข้มพีคมีค่าเท่ากับ 0.381877, 0.361257, 0.355856 และ 0.2265 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม ปริมาณของฮาร์ดเดนเนอร์เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 จะ เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์จะแสดงดังรูปที่ 4.15) เนื่องจากมีหมู่เอมีนเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 4.9 (b) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมฮาร์ดเดนเนอร์ที่ 20 phe จะยังมีพีคของหมู่ออกซิเรนที่  $915\text{ cm}^{-1}$  อยู่เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ และเมื่อทำการเพิ่ม ปริมาณฮาร์ดเดนเนอร์ที่ 35, 50 และ 100 phe พบว่าพีคที่ตำแหน่ง  $915\text{ cm}^{-1}$  ลดลง ซึ่งสามารถบ่ง บอกได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้น และนำขึ้นตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อหาอัตราส่วน ที่เหมาะสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์ในการปรับปรุงคอมโพลิท



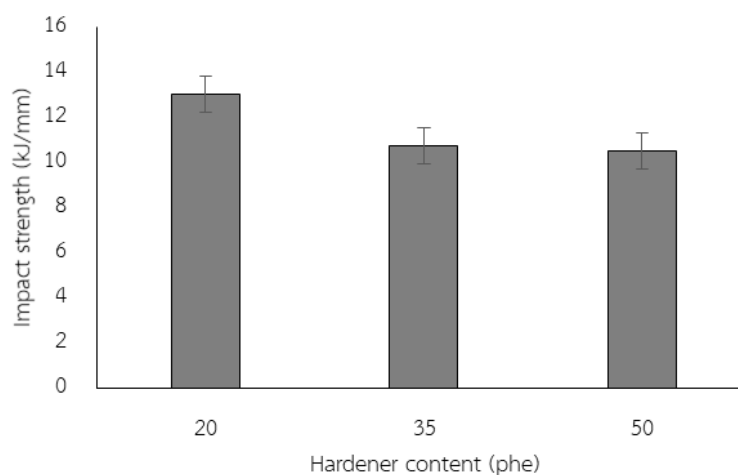
รูปที่ 4.9 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนของความเข้มพีคของอิพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์

Amount of hardener (phe)	C-H		C-O-C		Intensity ratio
	Peak position	Peak area	Peak position	Peak area	
20	2963	0.0309	915	0.0118	0.381877
35	2963	0.0382	915	0.0138	0.361257
50	2963	0.0444	915	0.0158	0.355856
100	2963	0.1117	915	0.0253	0.226521

#### 4.1.1.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

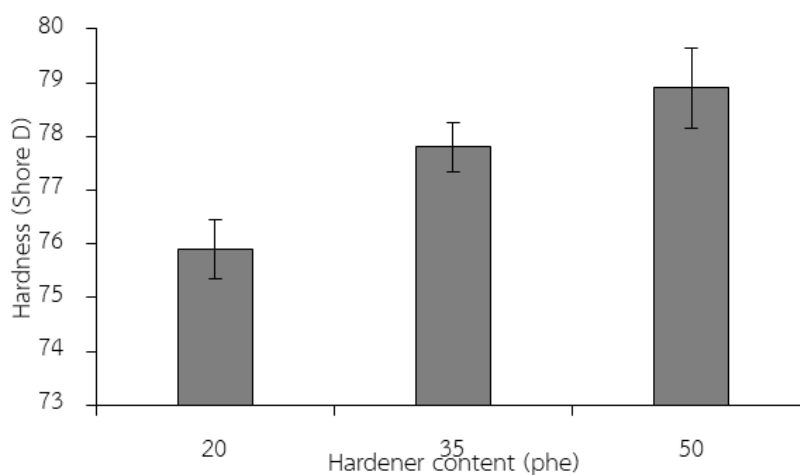
เมื่อนำอิพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR 50 และแปรปริมาณฮาร์ดเดนเนอร์ที่ 20, 35, 50 และ 100 phe พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของฮาร์ดเดนเนอร์ที่ 20, 35 และ 50 phe มีความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.05, 10.75 และ 10.54 kJ/mm ตามลำดับดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีปริมาณของหมู่เอมีนที่ทำปฏิกิริยากับวงแหวนออกซิเรนเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเชื่อมโยงพันธะมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานต่ำลง เนื่องจากสามารถกระจายพลังงานได้ยากขึ้น แต่ที่ปริมาณฮาร์ดเดนเนอร์ 100 phe อิพ็อกซีเรซินมีความหนืดสูงมากไม่เกิดการแข็งตัว อาจเนื่องมาจากปริมาณของฮาร์ดเดนเนอร์ที่มากเกินไป จึงส่งผลให้ไม่สามารถเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับนำมาทดสอบได้



รูปที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

#### 4.1.1.2 ความแข็ง

เมื่อนำอีพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR-50 และแปรปริมาณฮาร์ดเดนเนอร์ที่ 20, 35, 50 และ 100 phe พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของฮาร์ดเดนเนอร์ที่ 20, 35 และ 50 phe มีความแข็งอยู่ที่ 75.9, 77.8 และ 78.9 Shore D ตามลำดับดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของหมู่เอมีนที่ทำปฏิกิริยากับวงแหวนออกซิเรนเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเชื่อมโยงพันธะมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณฮาร์ดเดนเนอร์ 100 phe อีพ็อกซีเรซินมีความหนืดสูงมากไม่เกิดการแข็งตัวอาจเนื่องมาจากปริมาณของฮาร์ดเดนเนอร์ที่มากเกินไป จึงส่งให้ไม่สามารถเตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับนำมาทดสอบได้



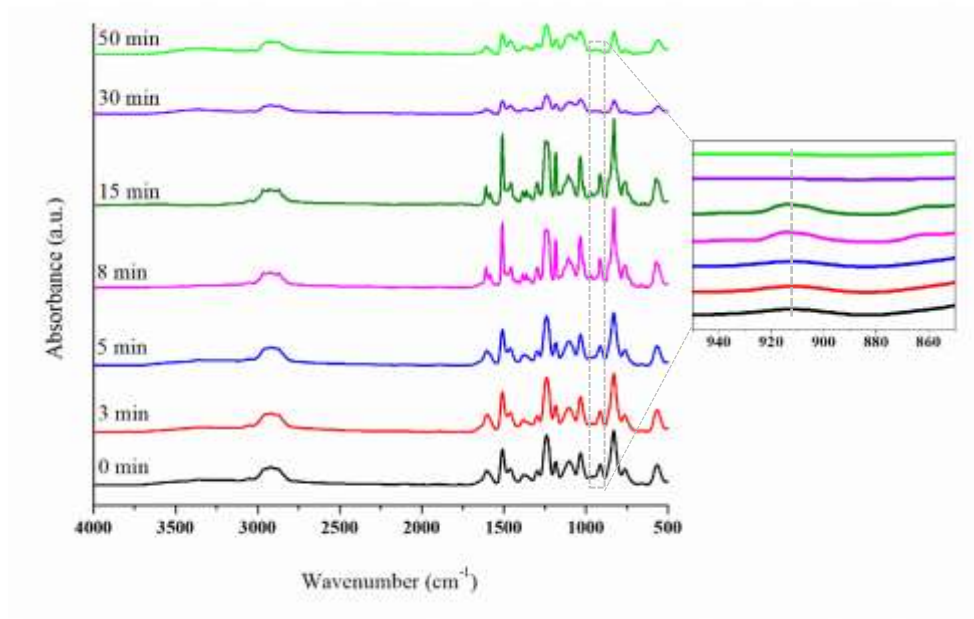
รูปที่ 4.11 ความแข็งของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์

#### 4.1.2 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการคงรูป

##### 4.1.2.1 เวลาในการเจล (Gel time)

เมื่อนำอีพ็อกซีเรซิน 100 phe ผสมกับฮาร์ดเดนเนอร์ 35 phe พบว่าหมู่วงแหวนออกซิเรนในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินจะเกิดการแตกออกแล้วทำปฏิกิริยาหมู่เอมีนของฮาร์ดเดนเนอร์ (การเกิดปฏิกิริยาของนำอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์ แสดงดังรูปที่ 4.15) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.12 พบว่าพีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของวงแหวนออกซิเรนคือ C-O-C ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $915\text{ cm}^{-1}$  โดยทำการคำนวณหาอัตราส่วนของความเข้มพีค (intensity ratio) โดยเทียบค่าการดูดกลืนแสง ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $915$  และ  $2963\text{ cm}^{-1}$  พบว่าอัตราส่วนของความเข้มพีคมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.7 แสดงว่าอีพ็อกซีเรซินจะเกิดปฏิกิริยากับ

ฮาร์ดเดนเนอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่จากรูปที่ 4.12 (a) จะเห็นได้ว่าที่เวลา 0-5 min ยังไม่เกิดปฏิกิริยาที่ชัดเจน และปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออ่านไป 8 min เป็นต้นไป ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 (b)



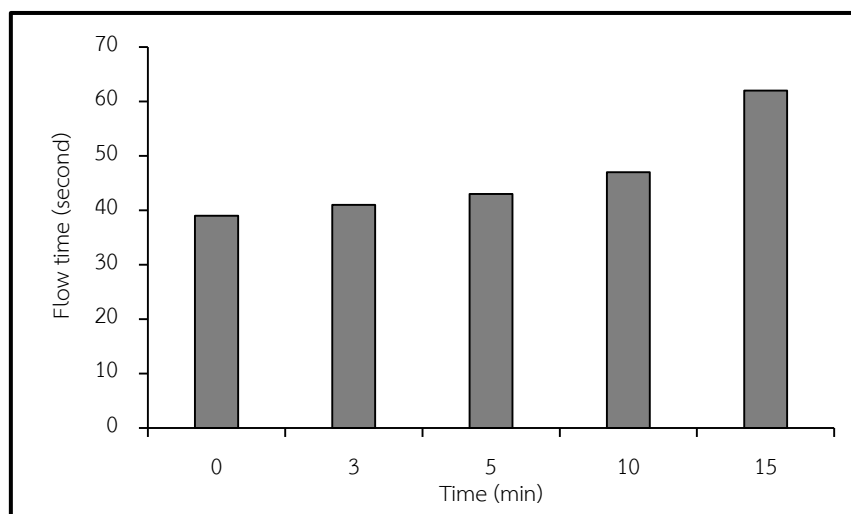
รูปที่ 4.12 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนของความเข้มพีคของอีพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์

Gel time (min)	C-H		C-O-C		Intensity ratio
	Peak position	Peak area	Peak position	Peak area	
0	2963	0.0668	915	0.0818	0.8166
3	2963	0.0694	915	0.0807	0.7600
5	2963	0.0662	915	0.0763	0.6676
8	2963	0.0627	915	0.1145	0.5476
15	2963	0.0603	915	0.1188	0.5076
30	2963	0.0603	915	0.1197	0.5037
50	2963	0.0602	915	0.1288	0.4674

#### 4.1.2.2 เวลาในการไหล (Gelling time)

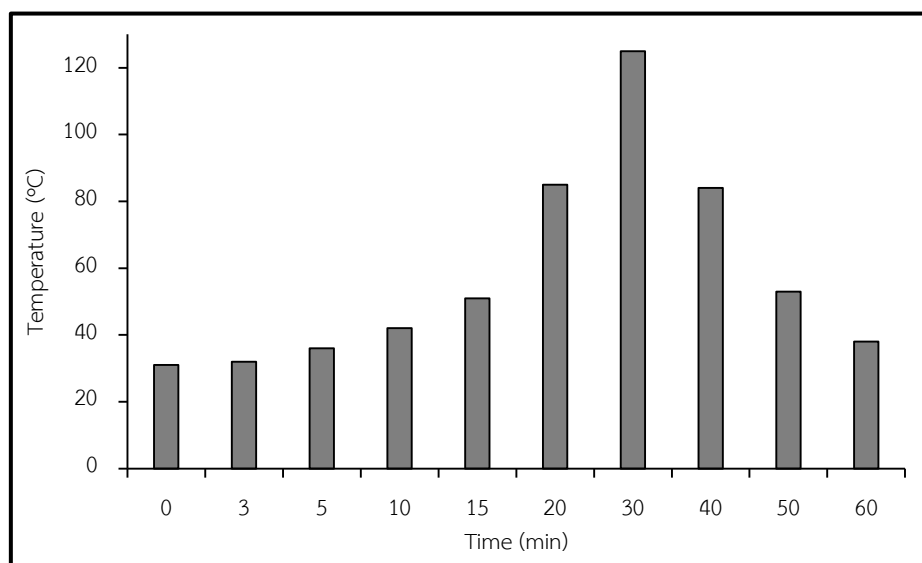
เมื่อนำอิพ็อกซีเรซินผสมกับฮาร์ดเดนเนอร์เพื่อดูเวลาในการไหลเมื่อระยะเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อระยะเวลาในการผสมเพิ่มขึ้นเวลาในการไหลจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยแสดงดังรูปที่ 4.13 และเมื่อใช้เวลาในการผสม 30 นาที พบว่าอิพ็อกซีเรซินเกิดการเจลและไม่สามารถไหลได้ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปเกิดปฏิกิริยาขึ้น จึงทำให้มีการเชื่อมโยงของพันธะเพิ่มขึ้นส่งผลให้อิพ็อกซีเรซินมีความหนืดเพิ่มขึ้น เวลาในการไหลจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 เวลาในการไหลของอิพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนอร์

#### 4.1.2.3 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

เมื่อนำอิพ็อกซีเรซินผสมกับฮาร์ดเดนเนอร์และทำการวัดอุณหภูมิขณะผสม พบว่าเมื่อระยะเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เวลา 0-5 min มีค่าอยู่ที่อุณหภูมิห้อง คือ 31, 32 และ 36 °C จะเห็นว่ายังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด บ่งบอกได้ว่าในช่วงเวลานี้อิพ็อกซีเรซินและฮาร์ดเดนเนอร์ยังไม่เกิดปฏิกิริยา และเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 5 min พบว่าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการเจลที่เวลา 30 นาที และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 125 °C เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาจะมีการคายความร้อน หลังจากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้ว ส่งผลให้การคายความร้อนไม่เกิดขึ้น อุณหภูมิที่วัดได้จึงมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.14 อุณหภูมิขณะผสมของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนอร์

#### 4.1.2.4 เวลาในการคงรูป

เวลาในการคงรูปเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซิน เมื่ออีพ็อกซีเรซินทำปฏิกิริยาร่วมกับฮาร์ดเดนเนอร์ จะทำให้โมเลกุลของอีพ็อกซีเรซินเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห อุณหภูมิในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อีพ็อกซีเรซินมีความหนืดสูงขึ้น และทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น เมื่อนำยาง ENR มาผสมลงในอีพ็อกซีเรซินในปริมาณ 0-3 phr จะทำให้เวลาในการคงรูปสั้นลงดังตารางที่ 4.8 ทั้งในกรณีของยาง ENR 25 และ ENR 50 เป็นผลเนื่องมาจากสารคงรูปสามารถทำปฏิกิริยากับวงแหวนออกซิเรนในโครงสร้างของยาง ENR ได้ ทำให้ส่วนผสมมีความหนืดสูงขึ้น และส่งผลให้เวลาในการเซตตัวเร็วขึ้น แต่เมื่อปริมาณของยาง ENR 25 และ ENR 50 เพิ่มมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการเซตตัวอีพ็อกซีเรซินเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของยางที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องน้ำในระบบมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้ฮาร์ดเดนเนอร์ไปเกิดปฏิกิริยาร่วมกับน้ำที่มีอยู่ในระบบ ส่งผลให้สารคงรูปมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับอีพ็อกซีเรซิน และยาง ENR ได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chenhui Zhao เมื่อนำสารตัวเติมมาผสมลงในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR แล้วทำการศึกษาลักษณะการคงรูป ผลที่ได้แสดงดังตาราง 4.9 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการเซตตัวของนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณของนาโนซิลิกาที่เติมเข้าไปในปริมาณมาก เข้าไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาของอีพ็อกซีเรซินกับฮาร์ดเดนเนอร์ ทำให้เวลาในการเซตตัวเพิ่มขึ้น กรณีของการเติมนาโนเซลลูโลสลงไปในนาโนคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นคอมโพสิตจะเกิดการเซตเพิ่มขึ้น

เช่นเดียวกับคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการเซตตัวจะเห็นได้ว่าการใช้นาโนเซลลูโลสมีระยะเวลาในการเซตตัวเร็วกว่าคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystal) จึงทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอีพ็อกซีเรซิน ประกอบกับภายในโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นจำนวนมาก หมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้จึงไปปฏิกริยาร่วมกับฮาร์ดเดนเนอร์

ตารางที่ 4.8 เวลาการคงรูปของคอมโพสิตที่ปริมาณยาง ENR 25 และ ENR 50 ที่ต่างกัน

ชนิด ENR	ปริมาณ ENR (phe)	Gel point (min)	Setting point (min)
ENR 25	0	15	152
	1	59	141
	2	50	145
	3	53	162
	5	47	176
	7	41	185
	10	31	200
ENR 50	0	15	152
	1	57	113
	2	59	136
	3	42	137
	5	31	140
	7	29	152
	10	29	170

\* Gel point ดูด้วยสายตา

\*\* Setting point ดูด้วยสายตา



ตารางที่ 4.9 ลักษณะการคงรูปของคอมโพสิตของนาโนฟิลเลอร์ทั้งสองชนิด

ปริมาณนาโนฟิลเลอร์ (%wt)	Gel point (min)		Setting time (min)		Turbidity levels	
	NC	NS	NC	NS	NC	NS
0.25	16.00	16	90	138	4	2
0.5	20	18	120	165	4	2
0.75	21	23	158	195	4	2
1	25	27	270	235	4	3
1.25	40	35	356	415	4	3

\* นาโนเซลลูโลส = NC นาโนซิลิกา = NS

\*\* Turbidity levels = คือระดับความขุ่นของชิ้นงาน

1 =ใส (อ็ออกซีเรซิน)

3 = ขุ่นขึ้นปานกลาง

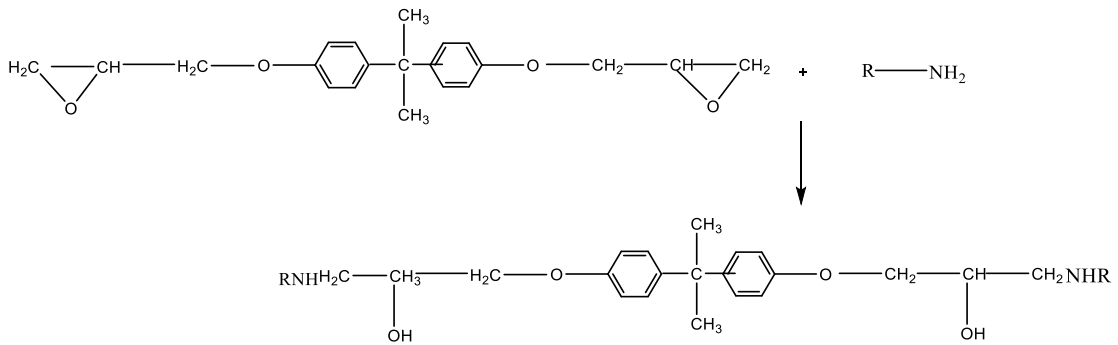
2 = ขุ่นขึ้นเล็กน้อย (โปร่งแสงเล็กน้อย)

4 = ขุ่นขึ้น (ไม่โปร่งแสง)

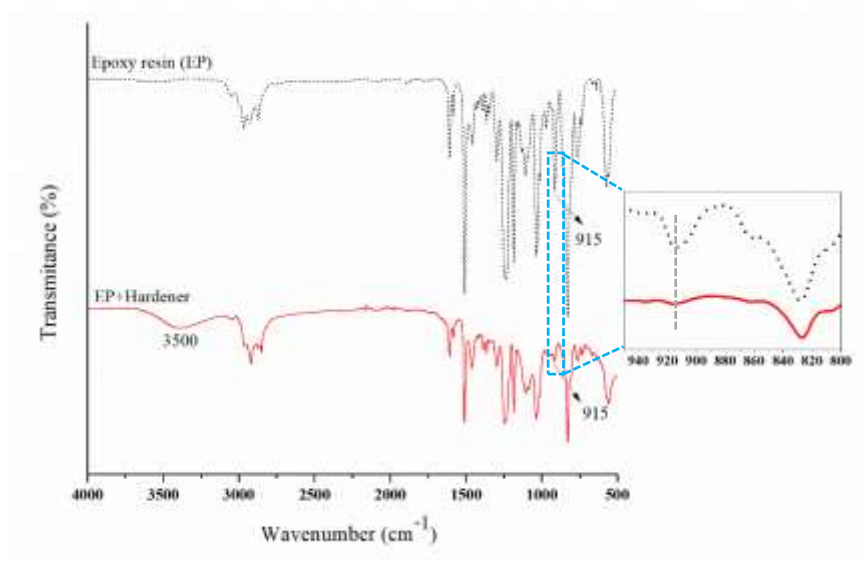
## 4.2 ศึกษาสมบัติเชิงเคมีของอ็ออกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค FTIR

### 4.2.1 อันตรกิริยาของอ็ออกซีเรซิน

เมื่อนำอ็ออกซีเรซินมาผสมกับฮาร์ดเดนเนอร์หมู่อ็ออกซีในโครงสร้างจะเกิดการแตกออกแล้วทำปฏิกิริยาหมู่อะมีนของฮาร์ดเดนเนอร์ และเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.15 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถยืนยันโดยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าพีกที่แสดงลักษณะเฉพาะของอ็ออกซีเรซินคือวงแหวนออกซิเรนคือ C-O-C ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $915\text{ cm}^{-1}$  [80] และจะปรากฏพีกที่สองตรงตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $2963\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการยึดของหมู่มะทิลีน (C-H) ในวงแหวนอ็ออกซี



รูปที่ 4.15 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนออร์

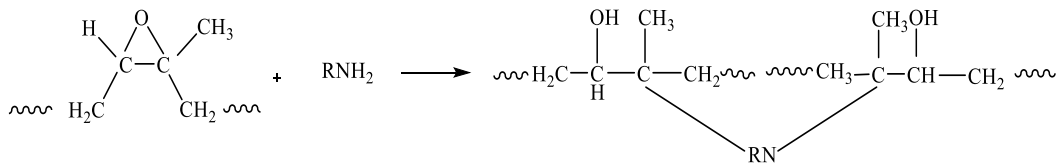


รูปที่ 4.16 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินผสมฮาร์ดเดนเนออร์

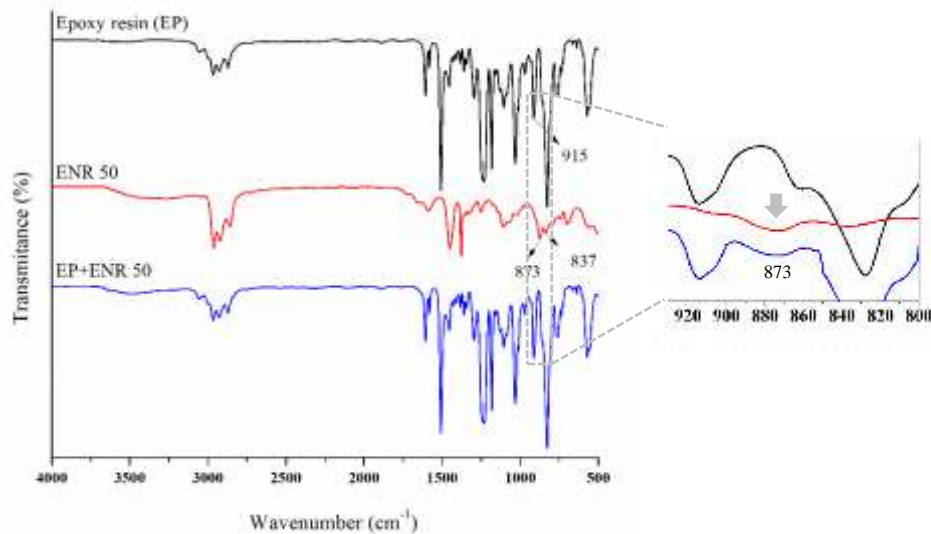
หลังจากผสมอีพ็อกซีเรซินกับฮาร์ดเดนเนออร์ พบว่าความเข้มพีคของหมู่เอพ็อกซีเรซิน (C-O-C) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 915 cm<sup>-1</sup> ลดลง ซึ่งสามารถยืนยันผลโดยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ โดยมีค่าลดลง จาก 544.51 เป็น 5.91 ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยากันระหว่างหมู่เอพ็อกซีเรซินของอีพ็อกซีเรซินกับฮาร์ดเดนเนออร์ เป็นผลเนื่องมาจากการแตกออกของวงแหวนเอพ็อกซีเรซินส่งผลให้หมู่เอพ็อกซีเรซินลดลง แต่เกิดหมู่ OH เพิ่มขึ้นภายในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซิน

#### 4.2.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนออร์

เมื่อนำยาง ENR 50 ผสมกับฮาร์ดเดนเนออร์ดังรูป 4.17 พบว่าหมู่ Epoxy group ในโครงสร้างของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์จะเกิดการแตกออกแล้วทำปฏิกิริยาหมู่เอมีนของฮาร์ดเดนเนออร์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกไซด์เรซินกับฮาร์ดเดนเนออร์ แสดงดังรูปที่ 4.17 และจากผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR พบว่าพีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่เอพอกไซด์เรซินของยาง ENR 50 ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $873\text{ cm}^{-1}$  มีพื้นที่ใต้กราฟลดลงจาก  $173.89$  เหลือ  $75.5$  แสดงให้เห็นว่ายาง ENR 50 สามารถเกิดปฏิกิริยากับฮาร์ดเดนเนออร์ได้เช่นกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของยาง ENR 50 ผสมฮาร์ดเดนเนออร์

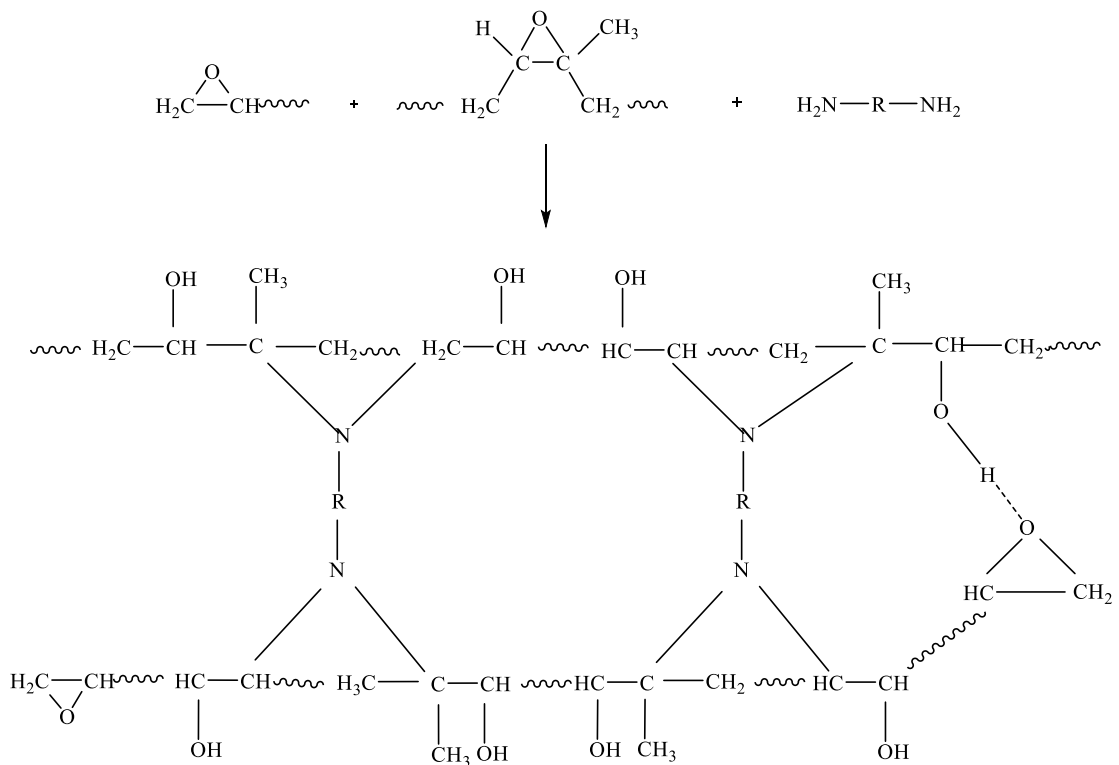


รูปที่ 4.18 FTIR สเปกตรัมของยาง ENR ผสมฮาร์ดเดนเนออร์

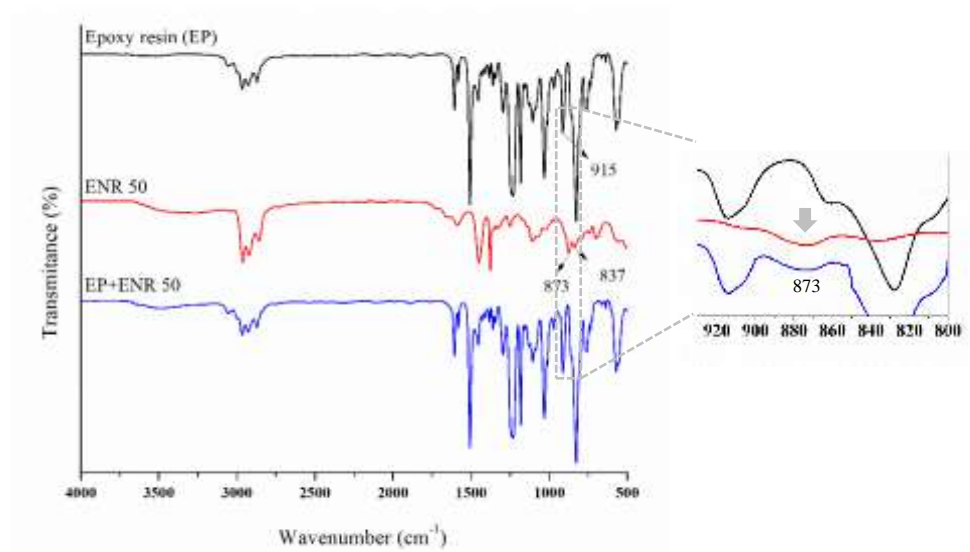
#### 4.2.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกไซด์เรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนออร์

เมื่อนำอีพ็อกไซด์เรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนออร์ดังรูป 4.19 พบว่าเมื่อเติมฮาร์ดเดนเนออร์ที่มีความว่องไวและมีหมู่ปลายที่เป็น  $\text{-NH}$  เมื่อเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกับวงแหวนออกซีเรซินที่อยู่ในโครงสร้างของอีพ็อกไซด์เรซินและยาง ENR 50 ส่งผลให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบโคเวเลนต์ ซึ่งวงแหวนออกซีเรซินจะเกิดการแตกตัวและเข้าทำปฏิกิริยากับฮาร์ดเดนเนออร์ ส่งผลให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล

(OH) เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.20 พบว่าพื้นที่ใต้กราฟของคอมโพลีท (อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และ ฮาร์ดเดนเนอร์) สูงกว่าเมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาตัวอื่นๆ ภายในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินที่ ตำแหน่งเลขคลื่น  $3340\text{ cm}^{-1}$  แต่พบว่าพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $915\text{ cm}^{-1}$  ภายในโครงสร้าง ของอีพ็อกซีเรซินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีหมู่เอพอกซีเรซินเพิ่มขึ้นและปฏิกิริยาเคมีของอีพ็อกซีเรซิน ผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์



รูปที่ 4. 19 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนอร์



รูปที่ 4.20 FTIR สเปกตรัมของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และฮาร์ดเดนเนออร์

### Part III: คอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

#### 4.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

ปรับปรุงคอมโพสิตโดยการเติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ลงในอีพ็อกซีเรซิน (อีพ็อกซีเรซิน:ฮาร์ดเดนเนออร์ 100:35) จากการศึกษ ปริมาณของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ในอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิต โดยทำการแปรชนิดและปริมาณของยาง ENR ในอัตราส่วน 0 3 5 7 และ 10 phr และศึกษาผลของสมบัติเชิงกลและลักษณะทางกายภาพของคอมโพสิต พบว่าลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งรูปที่ 4.21 (a) แสดงลักษณะอีพ็อกซีเรซิน โดยส่วนผสมที่ได้จะมีลักษณะใสไม่มีสี หลังจากมีการเติมยาง ENR 25 ดังรูป 4.21 (b) ส่วนผสมที่ได้จะเปลี่ยนจากสีใสกลายเป็นสีขาวขุ่น และเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง ENR 25 ที่ปริมาณ 5 phr อนุภาคของยางจะเกิดการแยกส่วนออกจากอีพ็อกซีเรซินอย่างชัดเจน และในกรณีของการเติม ENR 50 ส่วนผสมที่ได้จะมีสีขุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ ENR 25

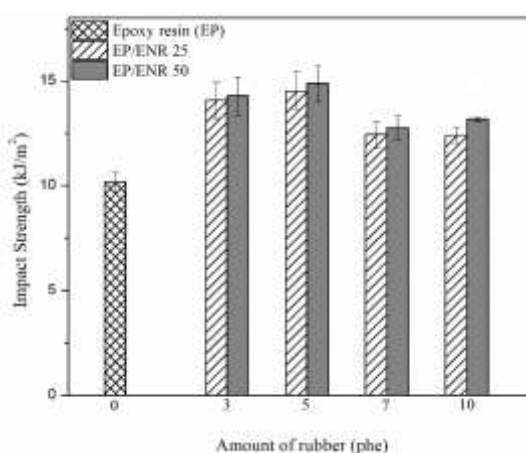


รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะทางกายภาพของ (a) Epoxy resin (EP), (b) EP/ENR 25 และ (c) EP/ENR 50

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล เมื่อทำการแปรปริมาณปริมาณของยาง ENR ในอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิต ซึ่งการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง การทดสอบความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก และการทดสอบความแข็ง โดยทำการแปรปริมาณของยาง ENR 0, 3, 5, 7 และ 10 phe โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ความต้านทานต่อแรงกระแทกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้เครื่องวัดการกระแทก ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นฉับพลัน เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดการผิดรูป ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับลักษณะของโครงสร้างโดยที่โครงสร้างแบบผลึกจะมีความแข็งแรงส่งผลให้เมื่อได้รับแรงกระแทกจะเกิดการผิดรูปหรือแตกหักได้ง่าย แต่หากวัสดุมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน ทำให้อุณหภูมิความแข็งเหนียวมากขึ้นส่งผลให้มีการปรับปรุงด้านความแข็งแรงของอีพ็อกซีเรซิน โดยแสดงดังรูปที่ 4.22



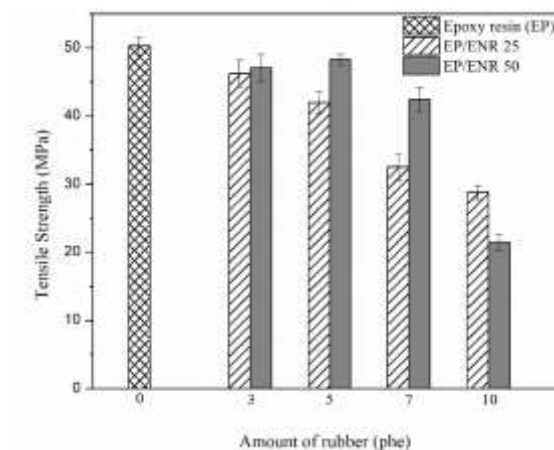
รูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

ค่าความต้านทานต่อการกระแทกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR เนื่องจากยางมีสมบัติความยืดหยุ่น เกิดการดูดซับและกระจายพลังงานเมื่อขึ้นตัวอย่างได้รับแรง ทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้ดี ซึ่งค่าความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมยางลงไปปริมาณ 0-5 phe และพบว่าที่ปริมาณ 5 phe ของยาง ENR จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงสุดในกรณีของยาง ENR 25 และ ENR 50 หลังจากปริมาณมากกว่า 5 phe ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอ ทำให้ค่าที่ได้ลดลง ซึ่งค่าความต้านทานต่อการกระแทกเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันทั้งในยาง ENR 25 และ ENR 50 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการกระแทกของยาง ENR 25 และ

ENR 50 พบว่าค่าความต้านทานต่อการกระแทกที่เติมยาง ENR 50 ให้ค่าสูงกว่า ยาง ENR 25 เนื่องจากยาง ENR 50 มีจำนวนของหมู่อีพ็อกไซด์ที่มากกว่าในยาง ENR 25 เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มากกว่าทำให้ยางแสดงสมบัติเป็นอีลาสติกและสามารถเก็บสะสมพลังงานเอาไว้ได้มากกว่า ในทางกลับกันแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่น้อยกว่าก็จะทำให้ยางแสดงสมบัติความเป็นอีลาสติกและเก็บรักษาพลังงานเอาไว้ได้น้อยกว่า

#### 4.1.2 ความต้านทานต่อแรงดึง

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยวัดค่าจากความสามารถในการจัดเรียงตัวของส่วนอสัณฐานและความแข็งแรงของการเชื่อมโยงในวัสดุ ผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23



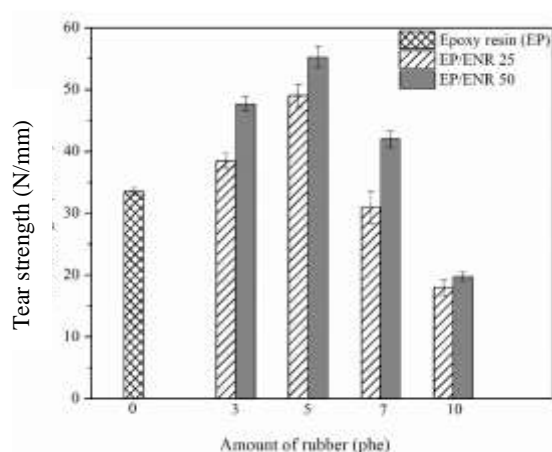
รูปที่ 4.23 ความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

จากรูปที่ 4.23 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่ทำการแปรปริมาณของยาง ENR แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินที่ไม่เติมยาง เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วยาง ENR จะมีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นเมื่อมีการนำวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเติมลงไปวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงอย่างอีพ็อกซีเรซิน ย่อมส่งผลให้อีพ็อกซีเรซินมีความแข็งแรงลดลง ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงและเมื่อเปรียบเทียบปริมาณยาง ENR ที่เติมลงไป จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่ยาง ENR 50 ที่ปริมาณไม่เกิน 5 phe [8, 10] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงระหว่างยาง ENR 25 และ ENR 50 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยาง ENR 50 มีแนวโน้มสูงกว่าเนื่องจากยาง ENR 50 มีปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ที่มากกว่า จึงมีความแข็งแรงที่สูงกว่ายาง ENR 25

ทำให้ต้องใช้แรงในการทำให้สายโซโม่เลกุลเคลื่อนที่มากกว่า ดังนั้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงจึงสูงกว่า ENR 25

#### 4.1.3 ความต้านทานต่อฉีกขาด

ค่าสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพลีเมอร์ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์เพิ่มขึ้นและสูงที่สุดที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ปริมาณ 5 phe ดังรูปที่ 4.24 ทั้งนี้เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง ENR กับอีพ็อกซีเรซินส่งผลให้อีพ็อกซีเรซินมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง ENR เท่ากับ 5, 7 และ 10 phe ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง ENR ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นจนกลายเป็นจุดด้อย (weak point) ส่งผลให้เมื่อได้รับแรง จึงเกิดการฉีกขาดได้ง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสนั้นลดลง และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของ ENR พบว่าการใช้ ENR 50 ให้ค่าสูงกว่า ENR 25 เนื่องจากมีปริมาณหมู่ออกซิเจนมากกว่า จึงเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง ENR กับอีพ็อกซีเรซินได้ดีกว่า



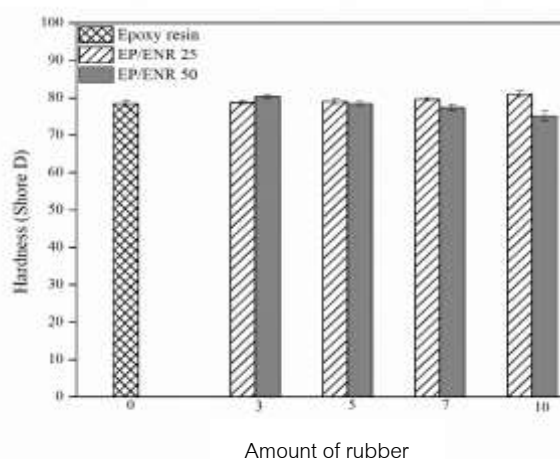
รูปที่ 4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพลีเมอร์ที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

#### 4.1.4 ความแข็ง

การทดสอบความแข็งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore D วัดค่าความแข็งของตัวอย่างอีพ็อกซีเรซินคอมโพลีเมอร์ที่ผสมยาง ENR 25 และ ENR 50 แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าค่าความแข็งเริ่มต้นของอีพ็อกซีเรซินมีค่าสูงที่สุดประมาณ 79 shore D แต่เมื่อผสมยาง ENR 50 ลงในเฟสของอีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วน 3, 5, 7 และ 10 phe พบว่าค่าความแข็งมี



แนวโน้มลดลงตามปริมาณของยาง ENR เพิ่มขึ้น (Pithaksareetham, 2017) ทั้งในกรณีของ ENR 25 และ ENR 50 เนื่องจากภายในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินประกอบด้วยหมู่อะโรมาติก จึงส่งผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งที่มีความแข็งเปราะ ดังนั้นเมื่อมีการผสมยาง ENR ที่มีความยืดหยุ่นลงในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ความแข็งของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินลดลง

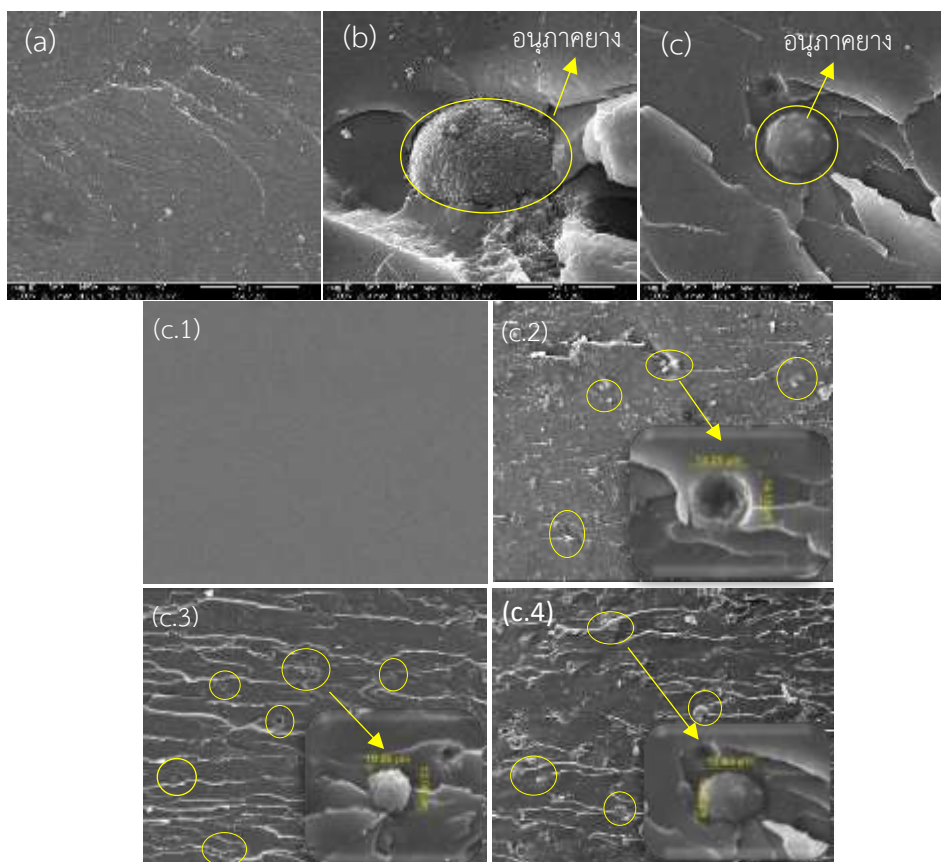


รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งของคอมโพสิตที่เติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

#### 4.5.5 ความเข้ากันได้ของคอมโพสิต

ผลการทดสอบความเข้ากันได้ของยาง ENR กับอีพ็อกซีเรซินแสดงดังรูปที่ 4.26 จากการศึกษาชนิดและปริมาณของยาง ENR เพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตยาง ENR พบว่าการใช้ยาง ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phr ต่อการใช้อีพ็อกซีเรซิน 100 ส่วน ส่งผลให้สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้ ซึ่งสามารถยืนยันผลดังรูปที่ 4.26 พบว่าอนุภาคของยางกระจายตัวในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน และเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ENR 50 มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า มีความเข้ากันได้กับอีพ็อกซีเรซิน เนื่องจากมีความเข้ากันได้ดี จึงส่งผลให้ปรับปรุงค่าต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงดึงได้ดีกว่า ENR 25 ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า ดังนั้นการใช้ยาง ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคอมโพสิตยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

หลังจากศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของยาง ENR ที่ใช้ พบว่าการใช้ยาง ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phr สามารถช่วยในการปรับปรุงอีพ็อกซีเรซิน ดังนั้นจึงเลือกใช้ ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phr ผสมลงในอีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วน 100:35 และทำการ ศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของสารตัวเติมสองชนิดดังหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.26 SEM micrograph ของคอมโพสิต (a) Epoxy resin; EP, (b) EP/ENR 25 5 phe (c) EP/ENR 50 5 phe ปริมาณยาง ENR 50 ; (1) 0.25 phr, (2) 0.5 phr, (3) 0.75 phr, and (4) 1.00 phr

#### Part IV: ปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินด้วยสารตัวเติม

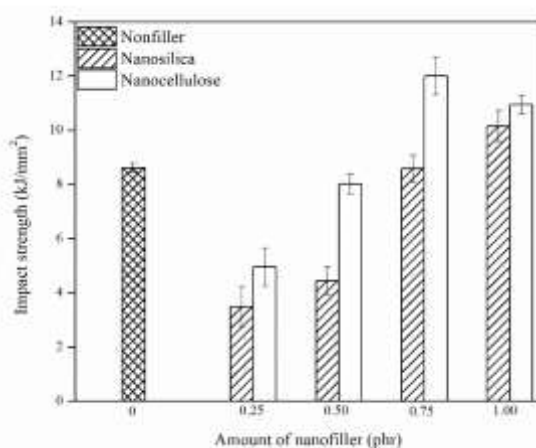
##### 4.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส)

ศึกษาลักษณะทางกายภาพและการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยอีพ็อกซีเรซิน และยาง ENR 50 โดยแปรปริมาณของสารตัวเติมในอัตราส่วน 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 phe ต่ออีพ็อกซีเรซิน 100 phe และศึกษาผลของสมบัติเชิงกลก่อนและหลังทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังนี้

###### 4.1.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ผลจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก เมื่อทำการแปรชนิดของสารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร โดยนาโนซิลิกาที่ใช้มีขนาดอนุภาค 50 nm และนาโนเซลลูโลสมีขนาดอนุภาค 20 nm ซึ่งสารตัวเติมเสริมแรงทั้งสองชนิดถูกเติมลงในอีพ็อกซีเรซินร่วมกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ โดยทำการแปรปริมาณ 0, 0.25, 0.50 และ 1.00 phe ดังรูปที่ 4.27 พบว่า

การเติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 0 - 0.25 phe ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณของสารตัวเติมมีปริมาณเพียงพอที่จะช่วยในการเสริมประสิทธิภาพแก่นาโนคอมโพสิต ประกอบกับสารตัวเติมทั้งสองชนิดมีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ นอกจากนี้ยังการเติมสารตัวเติมระดับนาโนทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 0.75 phe ให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดของสารตัวเติม พบว่าการใช้นาโนเซลลูโลสช่วยเสริมประสิทธิภาพแก่นาโนคอมโพสิตได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้นาโนซิลิกาที่ปริมาณเท่ากัน เป็นผลเนื่องมาจากนาโนเซลลูโลสมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่านาโนซิลิกา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าจะช่วยเสริมประสิทธิภาพได้ดีกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นการใช้นาโนเซลลูโลสที่ปริมาณ 0.75 phe จะช่วยให้เมทริกซ์ของนาโนคอมโพสิตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานไว้ได้ในปริมาณมาก จึงส่งผลให้การกระจายพลังงานในวัสดุดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหัก

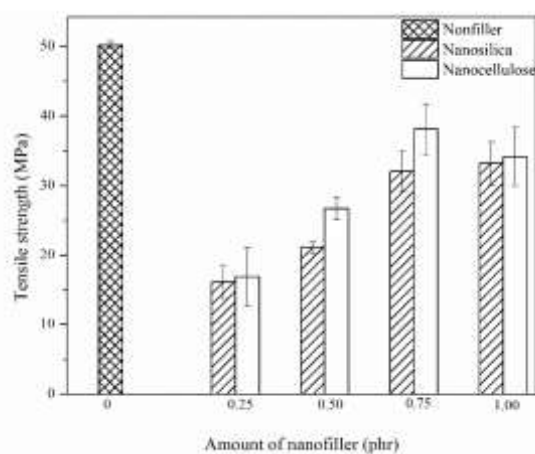


รูปที่ 4.27 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิต

#### 4.1.2 ความต้านทานต่อแรงดึง

จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง โดยนำชิ้นตัวอย่างที่เป็นอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ในอัตราส่วน 5 phr และแปรปริมาณสารตัวเติมสองชนิดที่ปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 phr ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 28 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของนาโนคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินที่เติมยาง ENR 50 มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่มีการเติมยาง เนื่องจากการเติมยาง ENR ลงในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซินจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นแก่อีพ็อกซีเรซิน จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง หลังจากมีการเติมสารตัวเติมลงไปพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมี

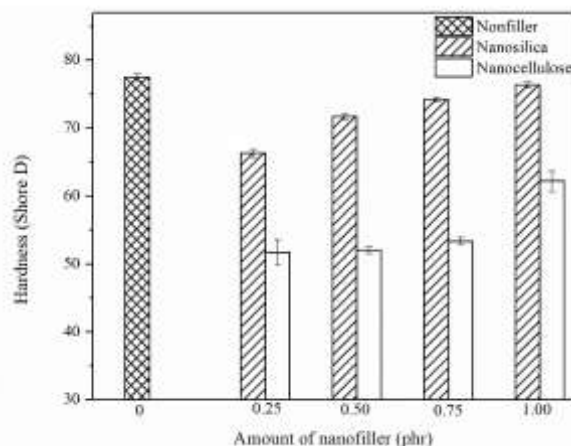
แนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองชนิดเป็นสารที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพให้แก่นาโนคอมโพสิตและเมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ พบว่าการใช้นาโนเซลลูโลสจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่า เนื่องจากนาโนเซลลูโลสมีขนาดอนุภาคที่เล็ก และเป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่นเดียวกับกับอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 รวมถึงนาโนเซลลูโลสมีโครงสร้างแบบผลึก จึงเข้ากันได้ดีกว่าและเกิดอันตรกิริยาทางเคมีได้สูงกว่านาโนซิลิกา



รูปที่ 4.28 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิต

#### 4.1.3 ความแข็งของนาโนคอมโพสิต

ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบได้จากการนำตัวอย่างมาทำการกดด้วยหัวเข็มแบบ Shore D โดยค่าที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่าค่าความแข็งเริ่มต้นของอีพ็อกซีเรซินนั้นมีค่าสูงที่สุดประมาณ 78 shore D แต่เมื่อผสมยาง ENR 50 และสารตัวเติมลงในเฟสของอีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่าความแข็งลดลงในช่วงแรกและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากภายในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินประกอบด้วยหมู่อะโรมาติก จึงทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งและมีความแข็งเปราะ ดังนั้นเมื่อมีการผสมยาง ENR 50 ที่มีความยืดหยุ่นลงในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ความแข็งของอีพ็อกซีเรซินลดลง แต่ในขณะเดียวกันเมื่อเติมวัสดุที่เป็นของแข็งลงไป จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่ค่าเพิ่มขึ้น



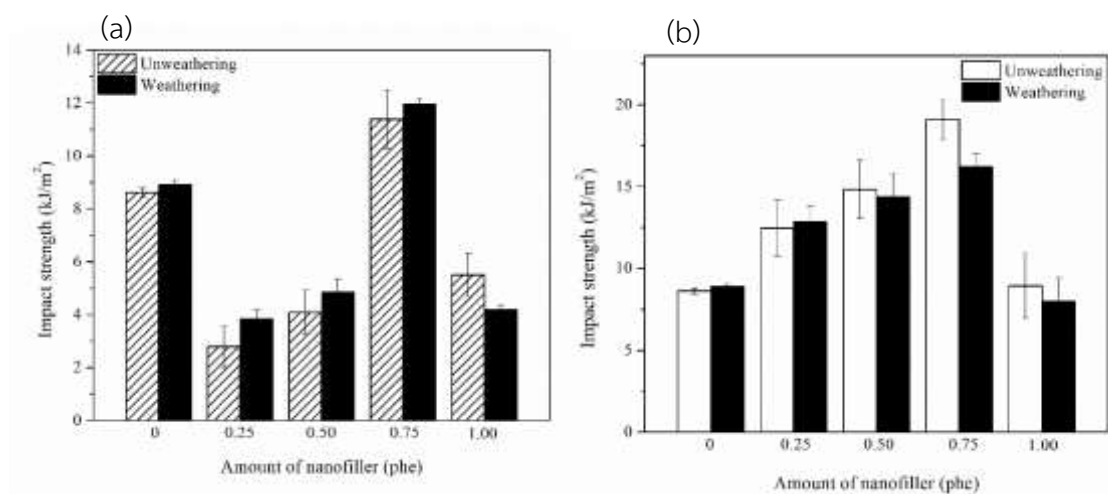
รูปที่ 4.29 ความแข็งของนาโนคอมโพสิต

#### 4.1.4 ความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน

การทดสอบโดยเครื่องเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM G14 cycle I และ cycle VII ขึ้นทดสอบจะได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงยูวีเอ (315-400 nm) หรือ UV-B (280-315 นาโนเมตร) สลับกับความชื้น ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ หลังการทดสอบทำการตรวจพินิจลักษณะภายนอก เช่น การแตก การขึ้นเหลือง ความมันวาว การเปลี่ยนแปลงของสี หรือนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพเช่น ความต้านต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง

##### 4.1.4.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ชิ้นตัวอย่างถูกนำไปทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานโดยเครื่องเร่งสภาวะการใช้งานเป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยใช้แสง UV-B หลังจากนั้นนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิการใช้งานปกติดังรูปที่ 4.30 พบว่าชิ้นตัวอย่างมีความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติทั่วไปแล้วอีพ็อกซีเรซินสามารถเกิดการวัลคาไนซ์โดยแสงได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนจากแสง UV-B ทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นและเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่ม ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้แรงหรือพลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหัก ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งเช่นเดียวกัน

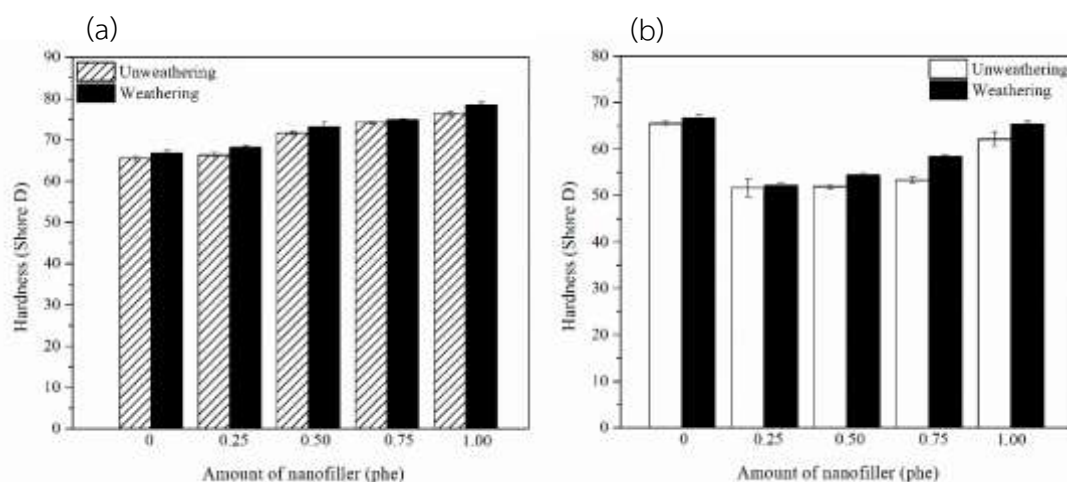


รูปที่ 4.30 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่เติม (a) นาโนซิลิกา และ (b) นาโนเซลลูโลสเปรียบเทียบก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน

และเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ พบว่าการใช้นาโนเซลลูโลสจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าการใช้นาโนซิลิกาที่ปริมาณเท่ากับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากนาโนเซลลูโลสจัดเป็นสารประกอบอินทรีย์เช่นเดียวกับอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR จึงเข้ากันได้ง่ายกว่านาโนซิลิกา ซึ่งเป็นประกอบอนินทรีย์ ประกอบกับนาโนเซลลูโลสมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับนาโนซิลิกา จึงผสมเข้าด้วยกันดีกว่าและเสริมประสิทธิภาพได้ดีกว่า

#### 4.1.4.2 ความแข็ง

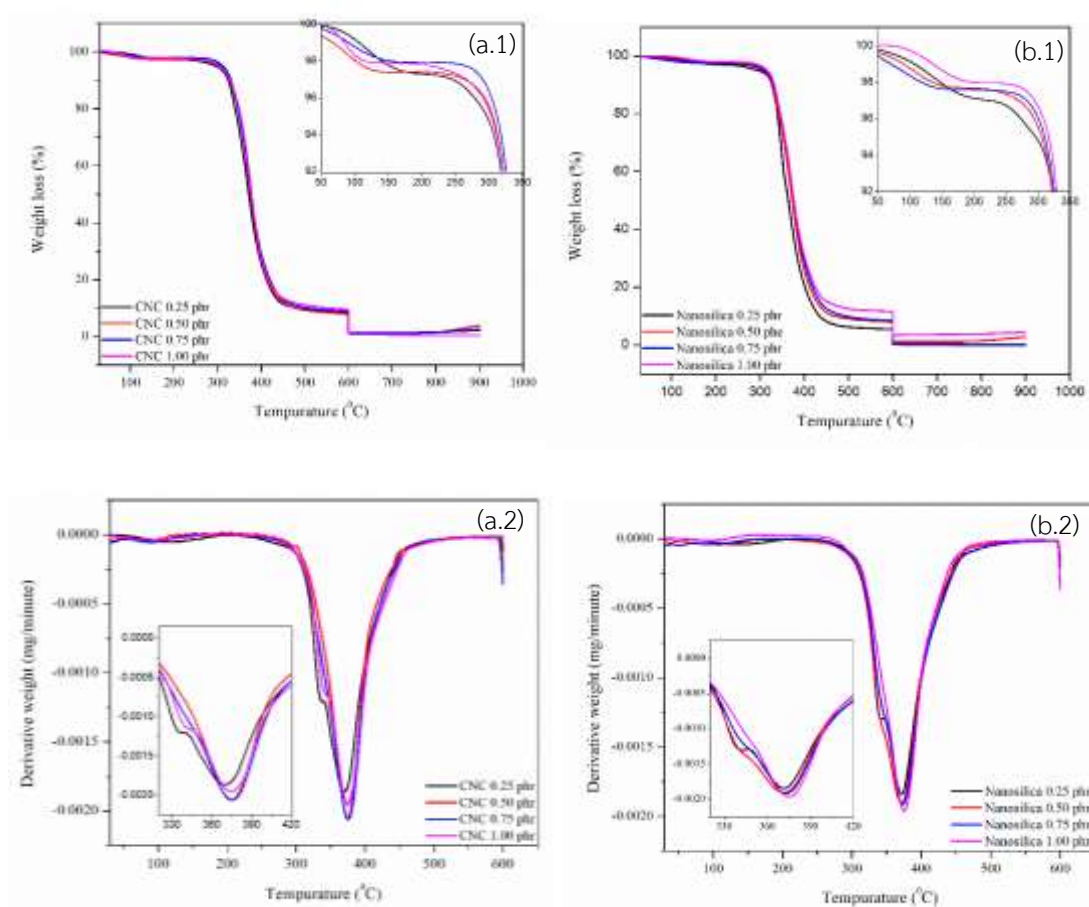
รูปที่ 4.31 แสดงความแข็งของนาโนคอมโพสิตหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการงา พบว่าหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการงาวัสดุนาโนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ในสภาวะปกติ เนื่องจากแสง UV-B ทำให้วัสดุนาโนคอมโพสิตเกิดการเสื่อมสภาพ ส่งผลชิ้นตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.31 ความแข็งของนาโนคอมโพสิต (a) นาโนซิลิกา และ (b) นาโนเซลลูโลส เปรียบเทียบก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน

#### 4.1.5 สมบัติทางความร้อน

รูปที่ 4.32 แสดงการสลายตัวความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนฟิลเลอร์แตกต่างกัน พบว่าการสลายตัวในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 330-350 °C ดังรูป 4.32 (a) โดยการสลายตัวข้างต้นนี้เป็นการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซิน และพบพฤติกรรมการสลายตัวนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนจากนาโนคอมโพสิตที่เติมซิลิกาในทุกๆ ปริมาณ ที่อุณหภูมิของการสลายตัว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตที่อุณหภูมิที่ 80% ของการสลายตัว พบว่าเมื่อปริมาณนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น ทำให้นาโนคอมโพสิตมีความต้านทานต่อความร้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากนาโนซิลิกามีความเสถียรทางความร้อนสำหรับการสลายตัวหลังการเปลี่ยนเป็นสถานะ  $O_2$  แสดงการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวเติมคือ นาโนซิลิกา แต่อย่างไรก็ตามการเติมนาโนซิลิกา 0.75 pbe แสดงความเสถียรทางความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับนาโนซิลิกาที่ปริมาณอื่นๆ ดังรูปที่ 4.32 (a) ในขณะที่เดียวกันการเติมนาโนเซลลูโลสผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการใช้นาโนซิลิกา คือ พบว่าการสลายตัวในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 340-350 °C ดังรูป 4.32 (b) โดยการสลายตัวข้างต้นนี้เป็นการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิที่ 80% ของการสลายตัว พบว่าเมื่อปริมาณนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ทำให้นาโนคอมโพสิตมีความต้านทานต่อความร้อนมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมนาโนเซลลูโลส 0.75 pbe แสดงความเสถียรทางความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับนาโนซิลิกาที่ปริมาณอื่นๆ ดังรูปที่ 4.32 (b)



รูปที่ 4.32 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่เติม (a) นาโนเซลลูโลส และ (b) นาโนซิลิกา ; (1) กราฟ TGA และ (2) กราฟ DTG

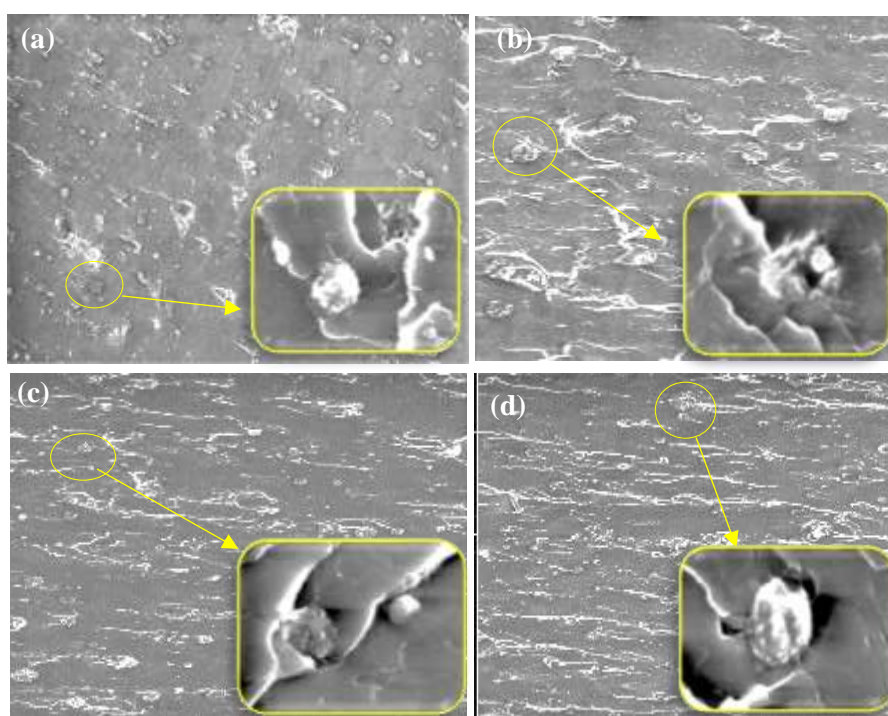
ตารางที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิการเสื่อมสลายของนาโนคอมโพสิต

Nanofiller loading (phr)	Onset (°C)		End set (°C)		Residue (%)	
	Nanocellulose	Nanosilica	Nanocellulose	Nanosilica	Nanocellulose	Nanosilica
0.25	340	330	400	400	1.0995	11.3252
0.5	340	340	410	410	1.1141	10.5780
0.75	350	345	410	415	1.4404	5.3512
1	350	350	410	417	1.5502	3.7534

#### 4.1.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

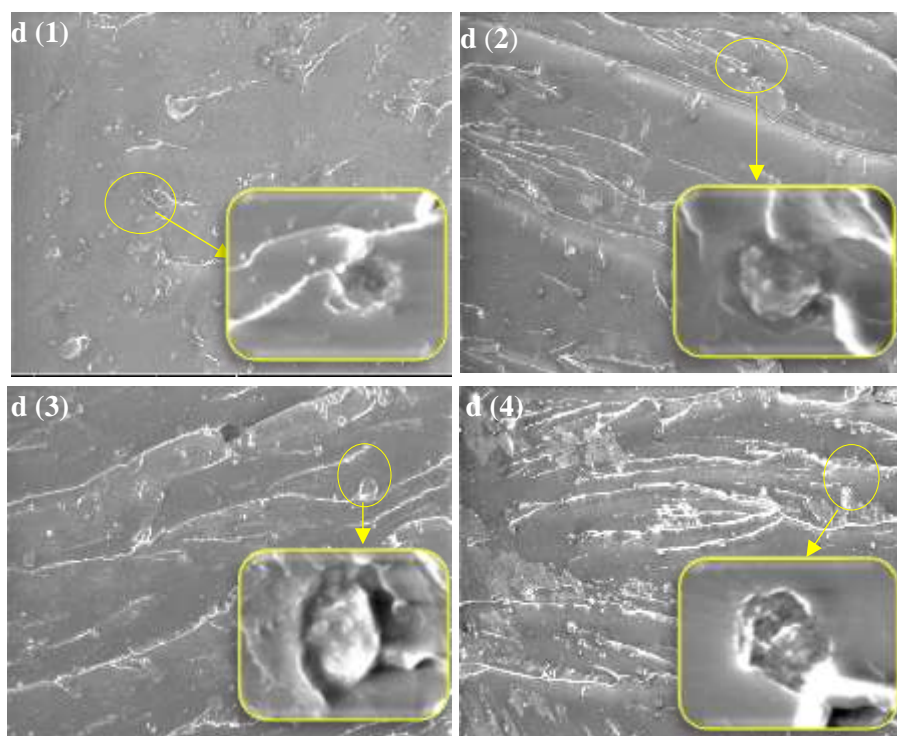


ผลการทดสอบความเข้ากันได้ของนาโนคอมโพสิตที่พอกซีเรซินที่เติมสารตัวเติมระดับนาโน แสดงดังรูปที่ 4.33 จากการศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต ยางธรรมชาติที่พอกซีเรซิน พบว่าการใช้นาโนเซลลูโลสที่ปริมาณ 0.75 phe ส่งผลให้สามารถปรับปรุง สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้ ซึ่งสามารถยืนยันผลดังรูปที่ 4.33 (c) พบว่าอนุภาคของยางกระจาย ตัวในเมทริกซ์ของอีพอกซีเรซิน และเห็นได้อย่างชัดเจนว่านาโนเซลลูโลสมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่นๆ มีความเข้ากันได้กับอีพอกซีเรซิน เนื่องจากเนื่องจากนาโนเซลลูโลสมี ส่วนที่เป็นทั้งอสัณฐาน (amorphous) และส่วนที่เป็นผลึก (crystallizes) รวมทั้งมีรูหรือช่องว่าง สามารถช่วยในการดูดซับพลังงานของนาโนคอมโพสิต ประกอบกับมีความเข้ากันได้ดี จึงส่งผลให้ ปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงดึงได้ดีกว่านาโนซิลิกา ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า ดังนั้นการใช้นาโนเซลลูโลสที่ปริมาณ 0.75 phe เป็นสูตรที่เหมาะสม สำหรับการปรับปรุงคอมโพสิตยางธรรมชาติที่พอกซีเรซิน



รูปที่ 4.33 SEM micrograph ของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสแตกต่างกัน

(a) 0.25 , (b) 0.50, (c) 0.75 และ (d) 1.00 phe



รูปที่ 4.34 SEM micrograph ของนาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน  
(a) 0.25, (b) 0.50, (c) 0.75 และ (d) 1.00 phe

เมื่อพิจารณาถึงรูปที่ 4.34 พบว่าการเพิ่มนาโนซิลิกาลงไปในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้อนุภาคสามารถเกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้นและขนาดอนุภาคยวดยิ่งที่กระจายตัวในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซินมีขนาดอนุภาคเล็กลง ทำให้สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจึงทำการศึกษาปริมาณของนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 phe อีกทั้งการใช้นาโนเซลลูโลสปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกแก่นาโนคอมโพสิต ยังไม่เพียงพอสำหรับการนำวัสดุนาโนคอมโพสิตไปประยุกต์ใช้ในใบพัดโดรน เนื่องจากค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานของนาโนคอมโพสิตใบพัดโดรน

## Part V: ปรับปรุงสมบัติของนาโนคอมโพสิตด้วยนาโนซิลิกา

### 4.1 ศึกษาอัตราส่วนของนาโนซิลิกาที่เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิต

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทดสอบสมบัติเชิงกล เมื่อแปรปริมาณนาโนซิลิการ่วมกับอีพ็อกซีเรซินและน้ำยาง ENR 50 ซึ่งการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง ทดสอบความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก และทดสอบความแข็ง โดยทำการแปรปริมาณของนาโนซิลิกาที่ปริมาณตั้งแต่ 0-5 phe และทำการทดลองรูปแบบในการผสมคือแบบ

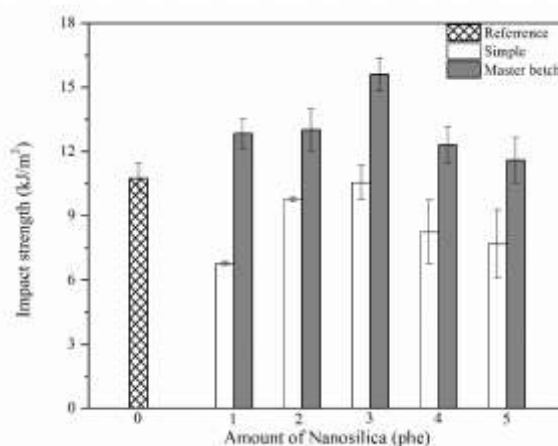
ปกติและแบบมาสเตอร์แบท ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 จากตาราง พบว่าในปริมาณนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจึงไม่ถือว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อศึกษาผลการทดลองในกรณีของความต้านทานต่อแรงดึงพบว่าแนวโน้มจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องจากนาโนซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปทำให้ขีดขวางการจัดเรียงตัวทั้งส่วนที่เป็นยาง ENR และส่วนหนึ่งขีดขวางการเกิดการคงรูปของอีพ็อกซีเรซินกับฮาร์ดเดนเนอร์ เนื่องจากยาง ENR บริเวณวงแหวนออกซิเรนริงสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับหมู่ของเอไมน์ของฮาร์ดเดนเนอร์ ทำให้ปริมาณหมู่เอไมน์ที่มีลดลงเกิดการคงรูปร่วมกับอีพ็อกซีเรซินในอีพ็อกซีเรซินลดลงความแข็งแรงจึงลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับความต้านทานต่อการฉีกขาดที่แนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกา งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงส่วนของความต้านทานต่อแรงกระแทกพบว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 0-3 phe และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อผสมกับนาโนซิลิกา 3 phe สูงกว่าคอมโพลีเมอร์ที่ไม่เติมนานาซิลิกา 54% ในรูปแบบมาสเตอร์แบท แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกามาสเตอร์แบทเพิ่มขึ้น 4-5 phe ความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง 52% และ 71% เนื่องจากนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมากเกินไปจนความจำเป็นจากการเพิ่มความแข็งแรงในยาง ENR 50 โดยนาโนซิลิกาที่เหลือจะขีดขวางการคงรูปและเกิดการเกาะกลุ่มของนาโนซิลิกากลายเป็นจุดอ่อนแอเมื่อกระทบกับแรงกระแทกจึงเปราะแตกหักได้ง่าย

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและรูปแบบการผสมต่างกัน

Nano-silica (g)	Tensile Strength (MPa)		Tear Strength (N/mm)		Hardness (Shore D)		Impact Strength (kJ/m <sup>2</sup> )	
	Master	Normal	Master	Normal	Master	Normal	Master	Normal
0	28.45 ± 3.34	28.45 ± 3.34	180.99 ± 12.71	180.99 ± 12.71	78.40 ± 0.80	78.40±0.80	7.00 ± 0.00	7.00 ± 0.00
1	37.60 ± 0.12	43.43 ± 2.47	170.43 ± 2.84	171.66 ± 2.73	78.80 ± 0.47	78.80 ± 0.98	8.02 ± 0.82	6.78 ± 0.11
2	32.07 ± 1.21	34.85 ± 5.14	160.12 ± 9.61	162.09 ± 2.61	79.00 ± 0.63	79.8 ± 0.75	10.16 ± 0.45	9.78 ± 0.11
3	30.11 ±1.49	31.50 ± 1.94	150.71 ± 5.00	158.92 ± 16.61	79.60 ± 0.49	80.0 ± 0.63	15.85 ± 0.45	10.56 ± 0.78
4	25.38 ± 2.07	29.43 ± 0.92	143.04 ± 8.44	156.15 ± 18.87	81.00 ± 0.89	80.0 ± 0.63	7.55 ± 0.64	8.25 ± 1.48
5	24.93 ± 0.73	28.57 ± 0.92	137.03 ± 6.18	139.85 ± 5.80	81.20 ± 1.16	80.4 ± 0.49	4.53 ± 0.28	7.70 ± 1.56

#### 4.1.1 ความต้านทานการกระแทก (Impact strength)

ความต้านทานการกระแทกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้เครื่องวัดการกระแทก โดยความต้านทานต่อแรงกระแทกจะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นฉับพลันเพื่อป้องกันไม่ให้อุบัติการเกิดรูป โดยแสดงดังรูปที่ 4.35

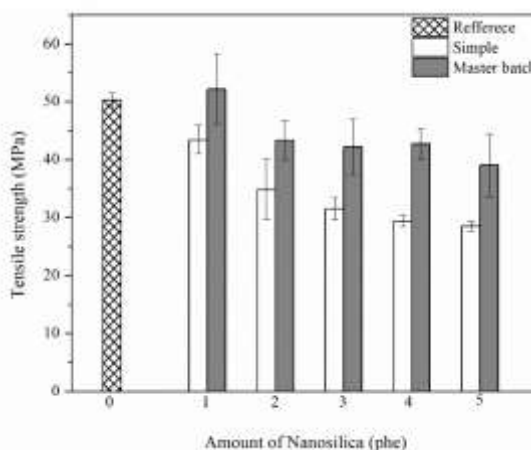


รูปที่ 4.35 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตที่แปรปริมาณนาโนซิลิกา และแปรรูปแบบการผสม

จากรูปที่ 4.35 แสดงความต้านทานต่อแรงกระแทกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกา 1-3 phe ต่ออีพอกซีเรซิน 100 ส่วน อาจเกิดจากนาโนซิลิกาขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงของอีพอกซีเรซิน ส่งผลให้เกิดส่วนที่เป็นอณูฐานที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นลดความแข็งแรงเนื่องจากคุณสมบัติเด่นของนาโนซิลิกาคือความสามารถในการดูดซับพลังงานเมื่อผสมเป็นคอมโพสิตที่มีทั้งยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจึงทำให้คอมโพสิตทนต่อแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น 53.74% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น 4-5 phe อาจเกิดการเกาะกลุ่มกันของนาโนซิลิกาจนเกิดเป็นจุดอ่อนแอ ความแข็งแรงจึงลดลงจึงมีความทนต่อแรงกระแทกได้น้อยลง 41.13% และ 45.22% โดยค่าทนต่อแรงกระแทกสูงที่สุดคือสูตรที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe และผสมแบบมาสเตอร์แบท เนื่องจากที่ปริมาณนาโนซิลิกา 3 phe เมื่อผสมในรูปแบบมาสเตอร์แบทแล้วเกิดอันตรกิริยาร่วมกับยาง ENR 50 เสริมความแข็งแรงและเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานเนื่องจากนาโนซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ลดการสะสมพลังงานในวัสดุที่เป็นยางเมื่อได้รับพลังงานหรือแรง ส่งผลให้เกิดการดูดซับพลังงานที่ดีและนาโนซิลิกาที่เกินจากการเกิดอันตรกิริยากับยาง ENR 50 ก็เกิดอันตรกิริยาร่วมกับเฟสของอีพอกซีเรซินส่งผลให้อีพอกซีเรซินมีความเหนียว (stiffness) เพิ่มขึ้นวัสดุจึงทนต่อแรงกระแทกดีขึ้น

#### 4.1.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยวัดค่าจากความสามารถในการจัดเรียงตัวของส่วนอสัณฐานและความแข็งแรงของการเชื่อมโยงในวัสดุผลึก ผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.36



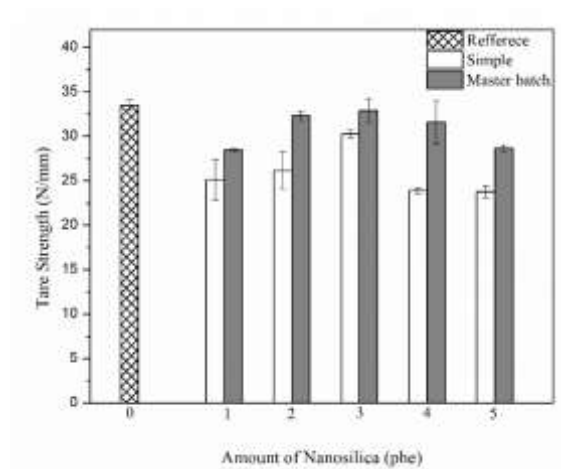
รูปที่ 4. 36 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและรูปแบบการผสมที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.36 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติมนาโนซิลิกาเพียง 1 phe เนื่องจากนาโนซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ดีในยาง ENR 50 ที่ผสมกับอีพอกซีเรซิน ส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากสูตรที่ไม่มีการเติมนาโนซิลิกา ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่มีความแข็งแรงจากเดิม 24.33% และ 34.49% ในการผสมรูปแบบมาสเตอร์แบทช์และรูปแบบธรรมดา แต่เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกา 2-5 phe แนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจากสูตรมาตรฐาน โดยที่ปริมาณนาโนซิลิกา 2 phe เพิ่มขึ้นจากเดิม 11.28% และ 18.36% จากการผสมรูปแบบธรรมดาและมาสเตอร์แบทช์ที่ปริมาณนาโนซิลิกา 3 phe พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลงไป 5.49% และ 9.71% ในรูปแบบมาสเตอร์แบทช์และรูปแบบธรรมดา และมีค่าต้านทานต่อแรงดึงจากสูตรมาตรฐานราว 0.42-1.30 % เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกา 4-5 phe เนื่องจากนาโนซิลิกาที่มากเกินไปเกิดการเกาะกลุ่มกันขัดขวางการเข้ากันได้ของ

ยาง ENR 50 นาโนซิลิกาและอีพอกซีเรซิน ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจึงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมนาโนซิลิกา

#### 4.1.3 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

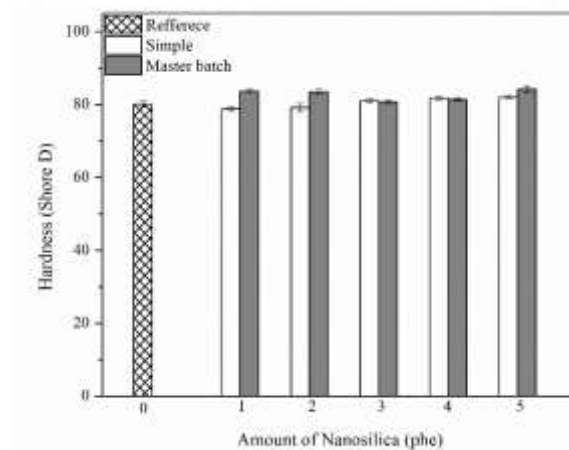
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยใช้เครื่อง Universal tensile testing machine วัดค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของตัวอย่างอีพอกซีเรซินคอมโพสิตที่ผสมกับยาง ENR 50 แสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกา และรูปแบบการผสมที่ต่างกัน

#### 4.1.4 ค่าความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore D วัดค่าความแข็งของตัวอย่างอีพอกซีเรซินคอมโพสิตที่ผสมยาง ENR 50 แสดงดังรูปที่ 4.38 ค่าความแข็งของคอมโพสิต เนื่องจากนาโนซิลิกาตั้งแต่ปริมาณ 0-5 pbe ซึ่งเป็นกลุ่มสารตัวเติมเสริมแรงเมื่อเติมลงในอีพอกซีเรซินคอมโพสิตที่ผสมกับยาง ENR 50 แล้วสามารถเกิดอันตรกิริยาร่วมกับยาง ENR 50 และอีพอกซีเรซินได้

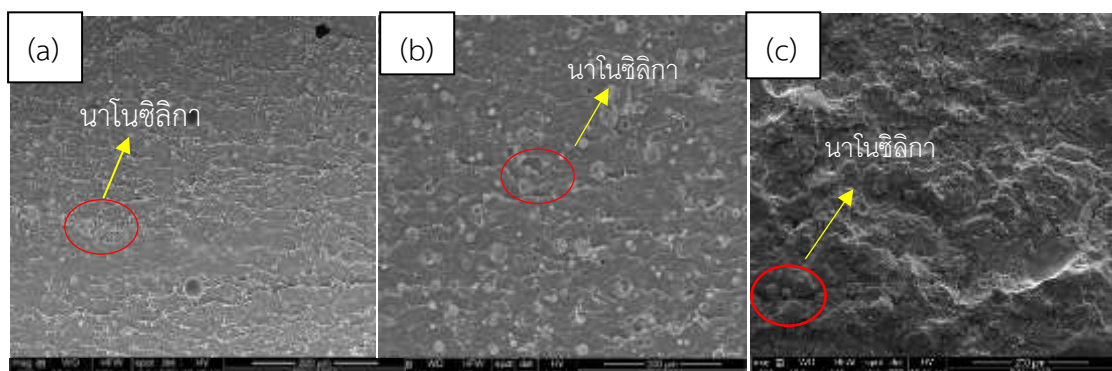


รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและรูปแบบการผสมที่ต่างกัน

ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณนาโนซิลิกาลงไปไม่ส่งผลให้ความแข็งเปลี่ยนไปโดยมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเติมนาโนซิลิกาไม่ส่งผลให้ความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงทั้งรูปแบบลำดับการผสมแบบปกติและแบบมาสเตอร์แบต

#### 4.1.5 ความเข้ากันได้ของนาโนคอมโพสิต

จากการพัฒนาสูตรปรับปรุงวัสดุนาโนคอมโพสิตโดยทำการแปรชนิดและปริมาณของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 25 และ ENR 50) พบว่าการใช้ยาง ENR 50 ปริมาณ 3 phe ให้ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อการฉีกขาดของอีพ็อกซีเรซินมีค่าเพิ่ม ซึ่งสมบัติที่เพิ่มขึ้นสามารถยืนยันได้จากผลทางลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยพบว่ายาง ENR 50 สามารถเกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน



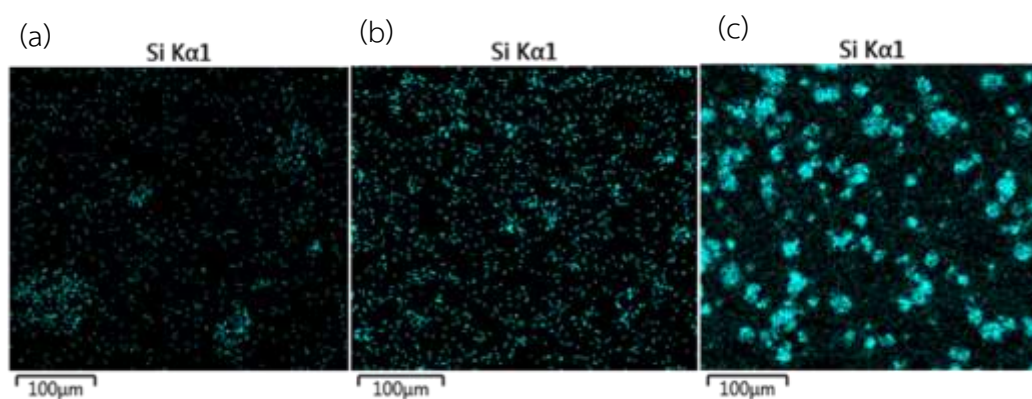
รูปที่ 4.39 SEM micrograph ของนาโนคอมโพสิต (a) นาโนซิลิกา 1 phe (b) นาโนซิลิกา 3 phe และ (c) นาโนซิลิกา 5 phe



แต่อย่างไรก็ตามการเติมยาง ENR ลงไปจะส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมโพสิตลดลง ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเติมสารเสริมแรงลงไปในคอมโพสิต ในงานวิจัยมีความสนใจเติมนาโนซิลิกาลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุนาโนคอมโพสิต เนื่องจากนาโนซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติสมบัติเชิงกลสมบัติทางความร้อนและลดการขยายตัวของรอยแตก โดยการศึกษาปริมาณของนาโนซิลิกา 0-5 phr ต่อสมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต จากการศึกษาพบว่าการใช้นาโนซิลิกาที่ปริมาณ 3 phr ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดังรูปที่ 4.39 พบว่านาโนซิลิกาสามารถเข้ากันได้ดีกับอีพ็อกซีเรซินและเกิดการกระจายตัวในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน และสามารถสังเกตได้ว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตเกิดการแยกเฟสกันระหว่างเฟสหลักคืออีพ็อกซีเรซินและเฟสรองคือยาง ENR และนาโนซิลิกา นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมนาโนซิลิกา 3 phr จะแสดงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน จึงส่งผลให้นาโนคอมโพสิตแสดงสมบัติเชิงกลสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้นาโนซิลิกาที่ปริมาณอื่นๆ ซึ่งการกระจายตัวของนาโนซิลิกาสามารถยืนยันได้ดังหัวข้อถัดไป

#### 4.1.6 การกระจายตัวของนาโนซิลิกาในนาโนคอมโพสิต

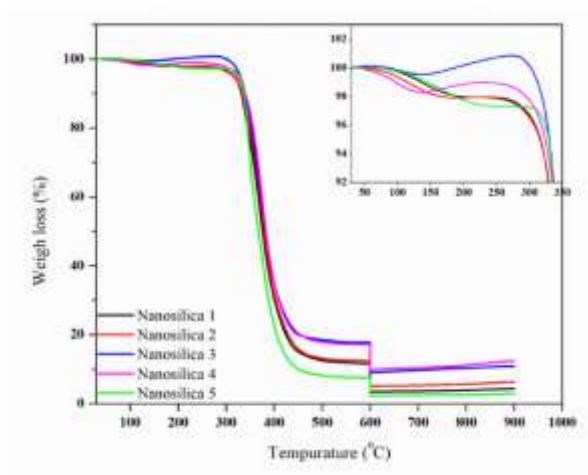
การกระจายตัวของนาโนซิลิกาในนาโนคอมโพสิตสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบ SEM-EDX แสดงดังรูปที่ 4.40 จากรูป (a) สามารถเห็นได้ชัดเจนว่านาโนซิลิกาเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้การเติมนาโนซิลิกา 3 phr จะแสดงสมบัติเชิงกลสูงสุด โดยนาโนซิลิกาที่มีอยู่ในนาโนคอมโพสิตจะปรากฏเป็นพิกของ Si ในกราฟของ SEM-EDX ดังรูปที่ 4.40 และเมื่อปริมาณนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้นสามารถสังเกตได้ว่านาโนซิลิกาเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerated) ดังรูป 4.40 (b) ซึ่งการเกิด agglomerate จะกลายเป็นจุดอ่อนแอ (Weak) จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณนาโนซิลิกาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.40 การกระจายตัวของนาโนซิลิกาในนาโนคอมโพสิต (a) นาโนซิลิกา 1 phr, (b) นาโนซิลิกา 3 phr และ (c) นาโนซิลิกา 5 phr

#### 4.1.7 สมบัติทางความร้อนนาโนคอมโพสิต

สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน ซึ่งผลแสดงจากกราฟ TGA โดยตัวอย่างได้รับการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 30-900 °C โดยช่วง 30-600 °C ตัวอย่างทดสอบในสถานะไนโตรเจน จากนั้นค้างที่อุณหภูมิ 600 °C ช่วงขณะก่อนที่จะเปลี่ยนสถานะการทดสอบเป็นสถานะออกซิเจน โดยพฤติกรรมตัวอย่างภายใต้ความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.41 การสลายตัวความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน การสลายตัวในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ซึ่งคาดว่าเป็นการสลายตัวของโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ และพบพฤติกรรมการสลายตัวนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนจากนาโนคอมโพสิตที่เติมซิลิกาในทุกๆ ปริมาณที่อุณหภูมิของการสลายตัว จากกราฟ TGA ประมาณ 370 °C โดยการสลายตัวข้างต้นนี้เป็นการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซิน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตที่ อุณหภูมิที่ 80% ของการสลายตัว พบว่าการแปรปริมาณสารตัวเติมผสมทำให้คอมโพสิตมีความต้านทานต่อความร้อนมากยิ่งขึ้น สำหรับการสลายตัวหลังการเปลี่ยนเป็นสถานะ O<sub>2</sub> แสดงการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวเติม คือนาโนซิลิกา แต่อย่างไรก็ตามการเติมนาโนซิลิกา 3 phe แสดงความเสถียรทางความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับนาโนซิลิกาที่ปริมาณอื่นๆ ดังรูปที่ 4.41 (b)



รูปที่ 4.41 การสลายตัวความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อการฉีกขาด สมบัติทางความร้อน และความเข้ากันได้ พบว่าการใช้นาโนซิลิกา 3 phe ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด ประกอบกับนาโนคอมโพสิตมีความเสถียรทางความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับนาโนซิลิกาที่ปริมาณอื่นๆ ดังนั้นในการพัฒนาปรับปรุงสูตรวัสดุนาโนคอมโพสิต จึงเลือกใช้ยาง ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phr และนาโนซิลิกา 3 phr ในการปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกของอีพ็อกซีเรซินสำหรับประยุกต์ใช้ในใบพัดโดรน

#### 4.1.8 การทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานของนาโนคอมโพสิต

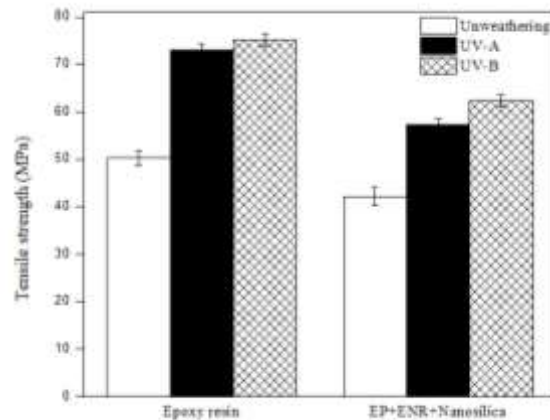
การทดสอบโดยเครื่องเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM G14 cycle I และ cycle VII ขึ้นทดสอบจะได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงยูวีเอ (315-400 nm) หรือยูวีบี (280-315 nm) สลับกับความชื้น ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ หลังการทดสอบทำการตรวจพินิจลักษณะภายนอก เช่น การแตก การขึ้นเหลือง ความมันวาว การเปลี่ยนแปลงของสี หรือนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพเช่น ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง

##### 4.1.8.1 ศึกษาสภาวะในการทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน

ในการหาสภาวะของการทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานของนาโนคอมโพสิต ทำการศึกษาชนิดของแสง UV ที่ใช้ในการทดสอบคือ UV-A และ UV-B ต่อสมบัติเชิงกลก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน

##### 4.1.8.1.1 ความต้านทานต่อแรงดึง

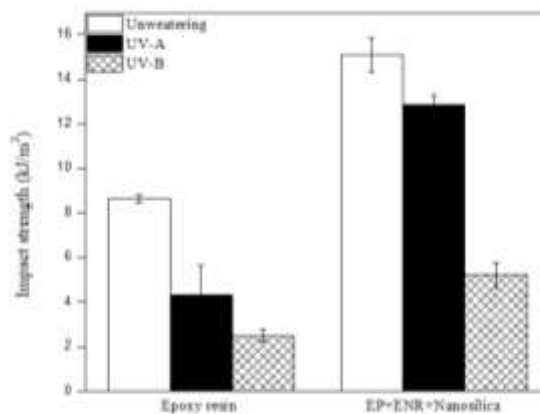
ชิ้นตัวอย่างถูกนำไปทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานโดยเครื่องเร่งสภาวะการดำเนินงานเป็นเวลา 168 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ในอุณหภูมิการใช้งานปกติดังรูปที่ 4.42 พบว่าชิ้นตัวอย่างมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่ใช้แสง UV-A และ UV-B เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะปกติ ผลที่ได้เนื่องจาก ในกระบวนการเตรียมชิ้นตัวอย่างถูกวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับแสง จึงส่งผลให้โมเลกุลของนาโนคอมโพสิตเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากอีพ็อกซีเรซินสามารถเกิดการวัลคาไนซ์โดยแสงได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามการใช้แสง UV-B จะแสดงความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้แสง UV-A



รูปที่ 4.42 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe

#### 4.1.8.1.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

รูปที่ 4.43 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกหลังจากนำชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะปกติ เนื่องมาจากหลังการการทดสอบทำให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลนาโนคอมโพสิตมีความเปราะเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นตัวอย่างมีความสามารถในการดูดซับและการกระจายพลังงานได้น้อยลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นตัวอย่างมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง เมื่อเปรียบเทียบชนิดของแสง UV ที่ใช้ พบว่าการใช้แสง UV-A จะแสดงความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าการใช้แสง UV-B



รูปที่ 4.43 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe

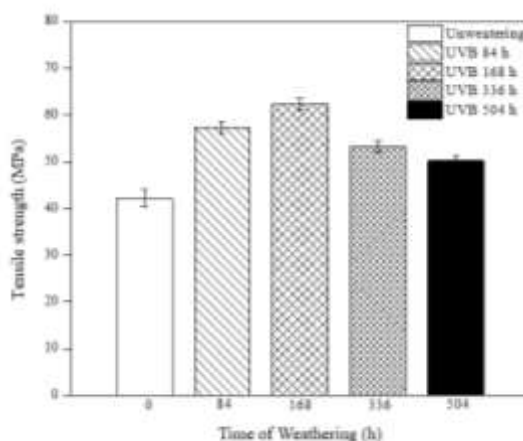
ผลการศึกษาหาสภาวะในการทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานของนาโนคอมโพสิต พบว่าการใช้แสง UV-B จะแสดงความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้แสง UV-A ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้แสง UV-B ในการศึกษาที่สมบัติเปลี่ยนแปลงไปของนาโนคอมโพสิตหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานที่เวลาการทดสอบแตกต่างกันดังแสดงในหัวข้อถัดไป

#### 4.1.8.2 ศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน

ในการศึกษาที่สมบัติเปลี่ยนแปลงไปของนาโนคอมโพสิตหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานที่เวลาการทดสอบ 0, 84, 168, 336 และ 504 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังหัวข้อถัดไป

##### 4.1.8.2.1 ความต้านทานต่อแรงดึง

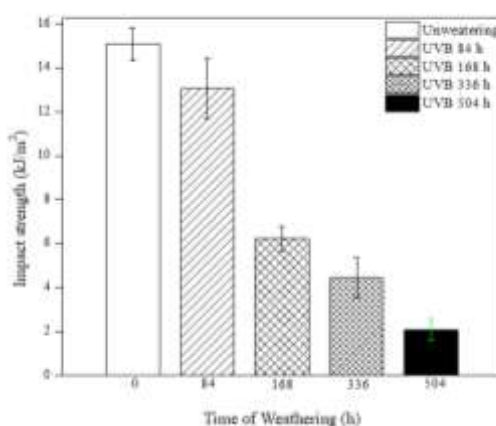
ชิ้นตัวอย่างถูกทำไปทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานโดยเครื่องเร่งสภาวะการใช้งานภายใต้สภาวะให้แสง UV-B ที่ความยาวคลื่น 313 nm ความเข้มแสง 1.55 w/m<sup>2</sup> เป็นเวลา 8 h หลังจากนั้นทำการสเปรสน้ำลงบนชิ้นตัวอย่าง 15 นาทีแล้วจึงทำการควบแน่นน้ำที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 h เมื่อครบเวลาตามกำหนดจึงนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิการใช้งานปกติดังรูปที่ 30 พบว่าชิ้นตัวอย่างมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่เวลาการทดสอบ 168 h เนื่องจากชิ้นตัวอย่างเกิดการ วัลคาไนซ์สมบูรณ์ แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมากกว่า 168 h ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตมีค่าลดลงเป็นผลเนื่องมาจากชิ้นตัวอย่างเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากได้รับแสง UV-B ในปริมาณมากเกินไปทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.44 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe

#### 4.1.8.2.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

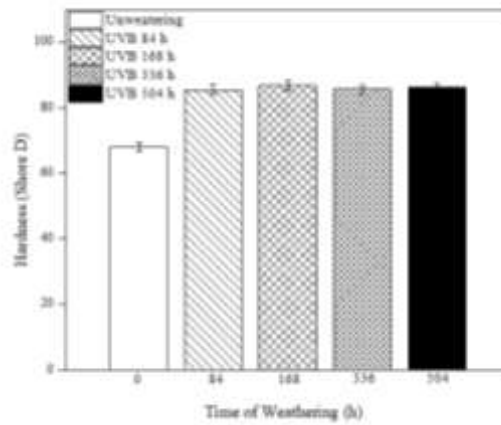
รูปที่ 4.45 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกหลังจากนำชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะปกติ เนื่องจากหลังจากการทดสอบทำให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลนาโนคอมโพสิตมีความเปราะเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นตัวอย่างมีความสามารถในการดูดซับและการกระจายพลังงานได้น้อยลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นตัวอย่างมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง



รูปที่ 4.45 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe

#### 4.1.8.2.3 ความแข็ง

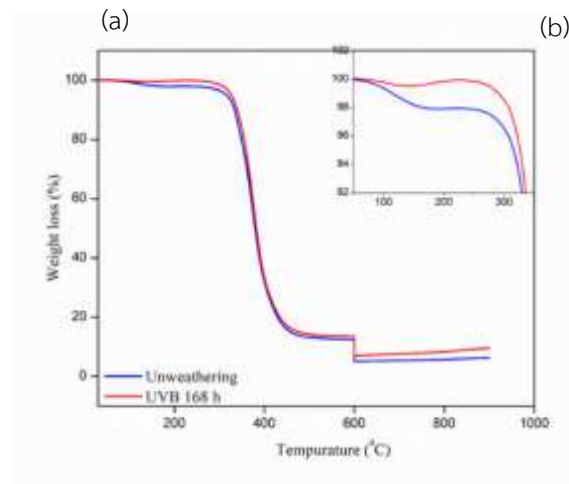
รูปที่ 4.46 แสดงความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่เวลาในการทดสอบแตกต่างกัน พบว่าหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานนาโนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ในสภาวะปกติ เนื่องจากแสง UV-B ทำให้วัสดุ นาโนคอมโพสิตเกิดการเสื่อมสภาพ ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.46 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe

#### 4.1.8 2.4 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตทดสอบด้วยเทคนิค TGA โดยตัวอย่างได้รับการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 30-900 °C โดยช่วง 30-600 °C ตัวอย่างทดสอบในสภาวะไนโตรเจน จากนั้นค้างที่อุณหภูมิ 600 °C ช่วงขณะก่อนที่จะเปลี่ยนสภาวะการทดสอบเป็นสภาวะออกซิเจน ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.47



รูปที่ 4. 47 การสลายตัวทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน

รูปที่ 4.47 การสลายตัวทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตก่อน-หลังทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน

รูปที่ 4.47 แสดงการสลายตัวความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน การสลายตัวในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ซึ่งคาดว่าเป็นการสลายตัวของโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ และพบพฤติกรรมสลายตัวนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนจากนาโนคอมโพสิตที่เติมซิลิกาในทุกๆ ปริมาณ ที่อุณหภูมิของการสลายตัว จากกราฟ TGA ประมาณ 370 °C โดยการสลายตัวข้างต้นนี้เป็นการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซิน และปริมาณของสารที่เหลืออยู่ประมาณ 6-7 % ดังรูปที่ 4.47 (a) เมื่อพิจารณารูป 4.47 (b) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานนาโนคอมโพสิตแสดงความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ในสภาวะปกติ เป็นผลเนื่องมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้นาโนคอมโพสิตมีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น

ในการพัฒนาปรับปรุงสูตรของวัสดุนาโนคอมโพสิต งานวิจัยจึงเลือกใช้ ENR 50 ปริมาณ 5 phe และนาโนซิลิกา 3 phe ต่ออีพ็อกซีเรซิน 100 ส่วน ในการปรับปรุงนาโนคอมโพสิต แล้วทำการศึกษาสภาวะการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติของวัสดุนาโนคอมโพสิตหลังจากขึ้นรูปในลำดับถัดไป

## Part VI: ศึกษาการขึ้นรูปไบพัตอากาศยานไร้คนขับ

### 4.1 ศึกษาการขึ้นรูปไบพัตอากาศยานไร้คนขับ

การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาขึ้นรูปเป็นไบพัตโดรนจำนวน 1-4 ชั้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.48 จึงทำการเลือกแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จำนวน 3 ชั้น มาขึ้นรูป โดยมีการแปรปริมาณนาโนซิลิกาเพื่อและศึกษาลักษณะทางกายภาพของไบพัตที่ได้ทำการผลิตเทียบกับลักษณะทางกายภาพของไบพัตที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน



รูปที่ 4.48 ลักษณะของไบพัตโดรนที่ขึ้นรูปได้ (a) CF 1, (b) CF 2, (c) CF 3 และ (d) CF 4 ชั้น



จากรูปที่ 4.48 พบว่าการเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกา ลงไปในคอมโพสิต จะส่งผลต่อการขึ้นรูปของไบพัตและลักษณะสีของชิ้นงานที่ได้กล่าวคือ ที่อัตราส่วนของนาโนซิลิกา 1-3 phe สามารถขึ้นรูปไบพัตไดรอนที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับไบพัตที่ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน แต่หลังจากมีการเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกา ส่งผลให้มีความหนืดเพิ่ม ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปส่งผลต่ออัตราการไหลของอีพ็อกซีเรซินข้างขณะทำการขึ้นรูปทำให้ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้เต็มแบบพิมพ์และพบว่าที่นาโนซิลิกา 4 phe ชิ้นงานจะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างคือ มีลักษณะสีขาวขุ่นเกิดขึ้นในชิ้นงาน จึงสรุปว่าปริมาณของนาโนซิลิกาที่เติมลงไปในคอมโพสิตไบพัตได้ที่ 3 phe เป็นอัตราส่วนที่มากที่สุดสำหรับขึ้นรูปไบพัตอากาศยานไร้คนขับด้วยแบบพิมพ์เพราะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีจากข้อสรุปดังกล่าวจึงนำนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปพร้อมกับคาร์บอนไฟเบอร์ไปศึกษาสมบัติเชิงกลดังหัวข้อถัดไป

#### 4.2 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์

ชิ้นตัวอย่างนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปพร้อมกับคาร์บอนไฟเบอร์ถูกทำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อการดัดงอ และความแข็ง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังหัวข้อถัดไป

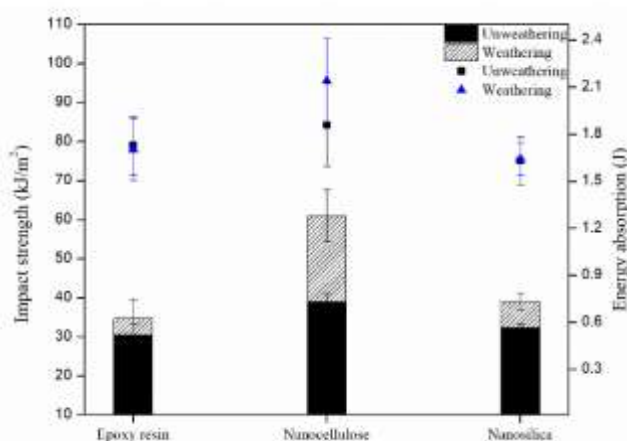
##### 4.2.1 นาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ที่เสริมแรงด้วยนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส

นาโนคอมโพสิตไฟเบอร์เป็นการขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเทคนิค hand lay up โดยมีแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และทำการเปรียบเทียบกับนาโนฟิลเลอร์ที่ปริมาณ 0.75 phe จากนั้นตัดขึ้นทดสอบด้วยเครื่อง CNC

###### 4.2.1.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ชิ้นตัวอย่างนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปพร้อมกับคาร์บอนไฟเบอร์ถูกทำไปทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานโดยเครื่องเร่งสภาวะการใช้งานเป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยใช้แสง UV-B หลังจากนั้นนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิการใช้งานปกติดังรูปที่ 4.49 พบว่าชิ้นตัวอย่างมีความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติทั่วไปแล้วอีพ็อกซีเรซินสามารถเกิดการวัลคาไนซ์โดยแสงได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนจากแสง UV-B ทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้แรงหรือพลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดการแตกหัก ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นตัวอย่าง พบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสแสดงค่า

ความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุดเมื่อเปรียบกับอีพ็อกซีเรซิน และอีพ็อกซีเรซินที่เติมนาโนซิลิกา เนื่องจากเนื่องจากนาโนเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นทั้งอสัณฐาน (amorphous) และส่วนที่เป็นผลึก (crystallizes) อีกทั้งยังมีรูหรือช่องว่างที่สามารถช่วยในการดูดซับพลังงานของชิ้นตัวอย่างได้มากขึ้น หลังจากนำชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจากแสง UV-B ทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งเพื่อศึกษาสถานะการใช้งาน

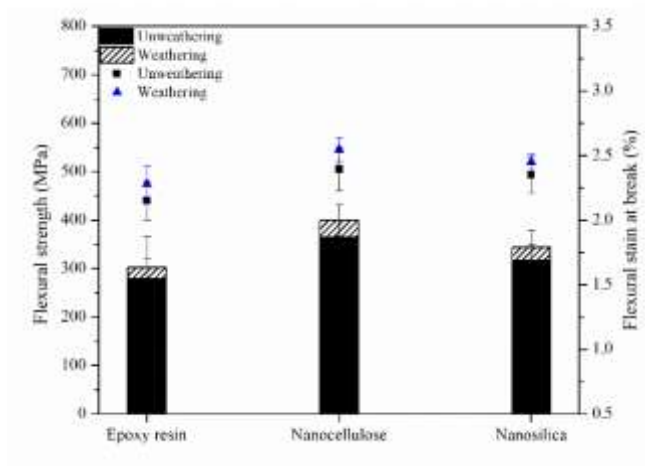


รูปที่ 4.49 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์

#### 4.2.1.2 ความต้านทานต่อการตัดโค้ง

การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอตามมาตรฐาน ASTM D790 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.50 ซึ่งสมบัติดัดงอมีความคล้ายคลึงกันกับสมบัติแรงดึงและคุณสมบัติแรงกระแทก โดยทั่วไปผลที่ได้จากการทดสอบ จะมีลักษณะคล้ายกันกับความต้านทานต่อแรงดึง คือเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากรูปที่ 4.50 แสดงแรงที่ใช้ในการทำชิ้นตัวอย่างเกิดการผิดรูป โดยจะแสดงถึงผลของสารตัวเติม (นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส) ที่แตกต่างกันต่อความต้านทานต่อการดัดงอของนาโนคอมโพสิต พบว่าความต้านทานต่อการดัดงอของนาโนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ถึง ความแข็งแกร่งที่สูงขึ้นของนาโนคอมโพสิต พื้นที่ผิวและความแข็งเปราะ (stiffness) ที่เพิ่มขึ้น หลังจากเติมนาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลสจะมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานต่อการดัดงอ เนื่องจากความเข้ากันได้และการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติมทั้งสองชนิด สิ่งที่น่าสนใจคือการปรับปรุงที่โดดเด่น คือการเติมนาโนเซลลูโลสให้ความต้านทานต่อการดัดงอมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบ

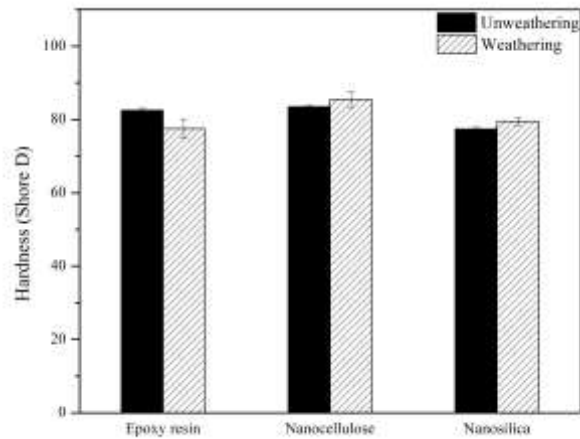
กับการเติมนาโนซิลิกา เป็นผลมาเนื่องจากการกระจายของนาโนเซลลูโลสที่มีประสิทธิภาพภายในอีพ็อกซีเรซินเมทริกซ์โดยไม่มีการรวมกลุ่ม นอกจากนี้ยังมีการรายงานเหตุผลที่เปรียบเทียบได้ในงานวิจัยอื่น ๆ ได้อธิบายว่า electrospun nanocellulose จากเซลลูโลสอะซิเตต (ECA) จะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงตัดและโมดูลัสตีขึ้น โดยการเติมนาโนเซลลูโลสไม่เกิน 1 wt% [81]



รูปที่ 4.50 ความต้านทานต่อการดัดงอของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์

#### 4.2.1.3 ความแข็ง

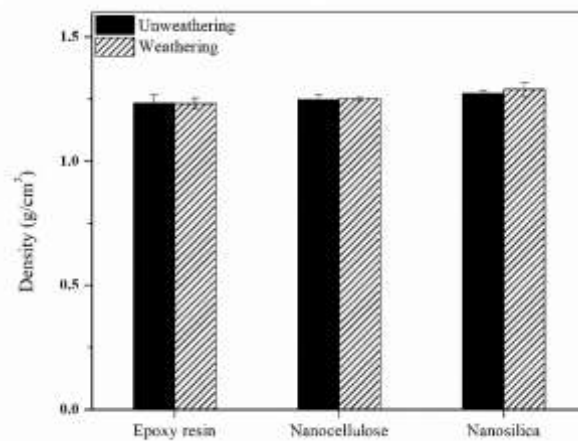
รูปที่ 4.51 แสดงความแข็งของนาโนคอมโพสิตหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานพบว่าหลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งานวัสดุนาโนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่เก็บไว้ในสภาวะปกติ เนื่องจากแสง UV-B ทำให้วัสดุนาโนคอมโพสิตเกิดการเสื่อมสภาพส่งผลชิ้นตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบค่าความแข็ง ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.51 ค่าความแข็งของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์

#### 4.2.1.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ ที่มีการเติมสารตัวเติมทั้งสองชนิด (นาโนซิลิกา และนาโนเซลลูโลส) หลังจากทดสอบความต้านทานต่อการใช้งาน พบว่าความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้ สามารถยืนยันได้ว่าการเติมยาง ENR และนาโนฟิลเลอร์จะไม่ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น

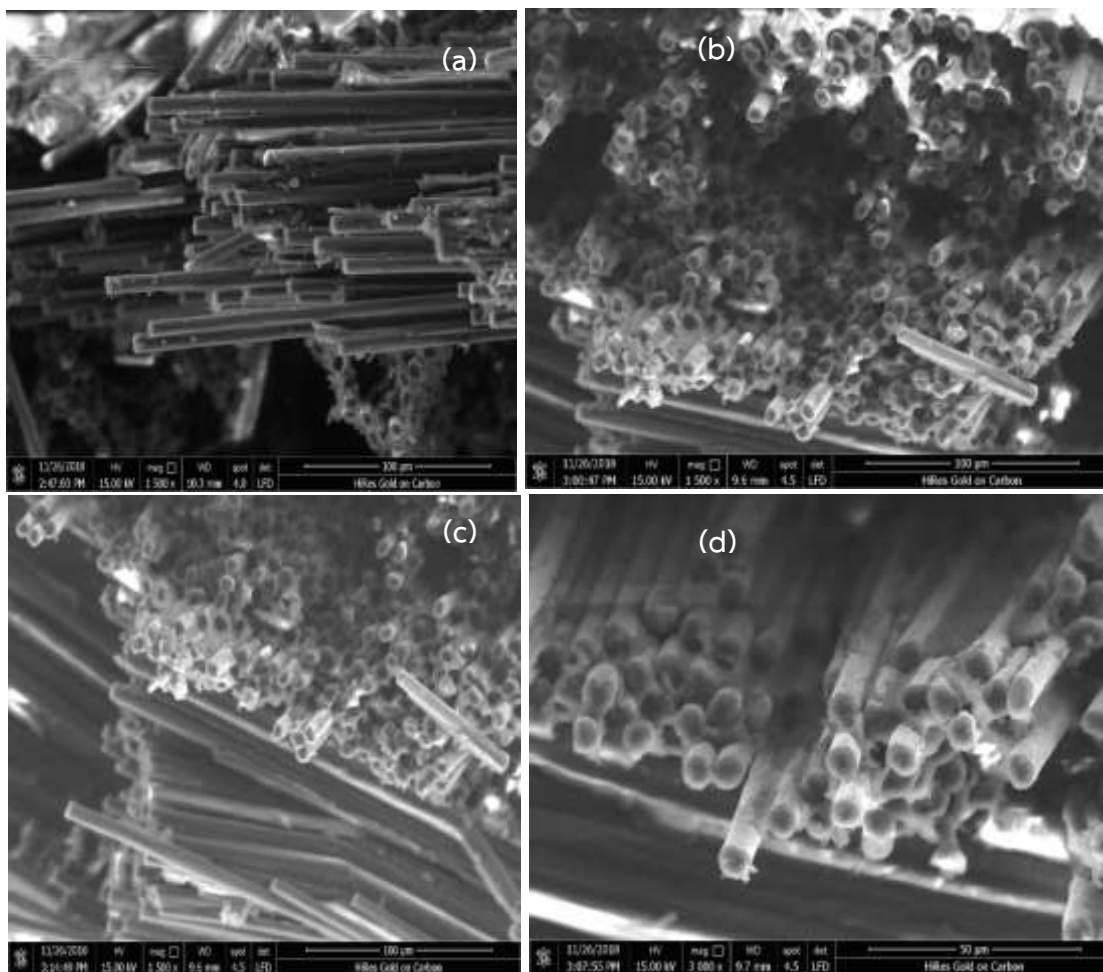


รูปที่ 4.52 ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์

#### 4.2.1.5 พื้นผิวแตกหัก (Fracture Surface)

พื้นผิวการแตกหักถูกได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์โดยมีเส้นใยแทรกอยู่ในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน การถ่ายเทความเครียด (stress transfer) ในเมทริกซ์ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างคอมโพสิตในคอมโพสิต [82] เพื่อตรวจสอบกลไกการแตกหักของวัสดุกระแทกแล้วทำไปทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.52 เห็นได้ชัดว่าในรูปที่ 4.52 (a) และ (b) วัสดุคอมโพสิตมีจำนวนมากและโพรงยังคงอยู่หลังจากที่เส้นใยถูกดึงออกจากเมทริกซ์การปรากฏตัวของรูเหล่านี้หมายถึงการเชื่อมต่อพันธะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่อ่อนแอ ดังนั้นเส้นใยจึงไม่สามารถถ่ายเทความเครียดภายในเมทริกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เติมนาโนเซลลูโลส ดังรูปที่ 4.52 (c) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์กลายเป็นองค์ประกอบหลักและไม่มีร่องรอยจะเห็นได้ว่าอนุภาคของเส้นใยถูกดึงออกมา (รูปที่ 4.52c) และ (d) แสดงภาพขนาดเล็กที่ถ่ายในพื้นที่แตกหักที่กำลังขยายสูง (3000X) แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยา (interaction) ที่มีประสิทธิภาพระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งสามารถมองเห็นได้เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ไม่เกิดการแยกส่วน ออกจากเมทริกซ์และมีอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งสามารถสามารถอนุมานได้จากภาพ ผลที่ได้เหล่านี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบแรงความต้านทานต่อแรงกระแทก มีหลายกลไกสำหรับการเกิดพันธะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไก (interlocking) เป็นแรงยึดติดทางกล การดูดซับอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา (adsorption interaction) และการแพร่กระจายของสายโซ่โพลิเมอร์ (diffusion) [83] การยึดติดที่แข็งแกร่งของคาร์บอนไฟเบอร์/อีพ็อกซีคอมโพสิต อาจเป็นผลมาจากความยืดหยุ่นของยาง ENR และนาโนเซลลูโลส ซึ่งช่วยให้มีการแพร่กระจายของพลังงานแก่เมทริกซ์ ซึ่งจะช่วยให้การยึดเกาะของระบบนี้ให้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามการใช้นาโนเซลลูโลสแม้จะช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกแก่วัสดุนาโนคอมโพสิต เพิ่มขึ้น 33% เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่มีการเติมยางและสารตัวเติม แต่พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์สำหรับใบพัดโดรน (ความต้านทานต่อแรงกระแทก <math>50 \text{ kJ/m}^2</math>)



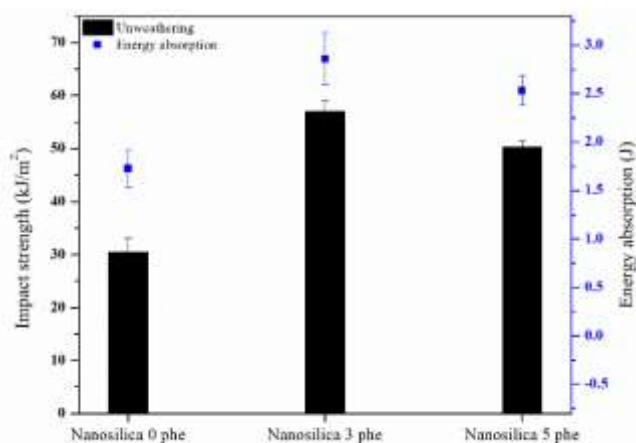
รูปที่ 4.53 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ (a) Epoxy resin (EP), (b) EP+ENR 50+Nanosilica และ (c), (d) EP+ENR 50+Nanocellulose

#### 4.2.2 นาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ที่เสริมแรงด้วยนาโนซิลิกา

นาโนคอมโพสิตไฟเบอร์เป็นการขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเทคนิค hand lay up โดยมีแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และทำการเปรียบเทียบนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 3 และ 5 phe จากนั้นตัดขึ้นทดสอบด้วยเครื่อง CNC แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 4.2.2.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ชิ้นตัวอย่างนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับคาร์บอนไฟเบอร์ถูกทำไปทดสอบความต้านทานแสดงดังรูปที่ 4.54 พบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตเคลือบแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดเมื่อเติมนาโนซิลิกาปริมาณ 3 phe เนื่องด้วยอนุภาคของยางมีส่วนดูดซับกระจายพลังงานและตัวนาโนซิลิกามีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวให้แก่เมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ค่าความเค้นครากดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกามากกว่า 3 phe พบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากนาโนซิลิกามีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้กระจายตัวได้ไม่ดีในอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้เมื่อนำไปเคลือบบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เกิดการยึดติดกันได้ไม่ดีทำให้ค่าที่ได้ลดลง

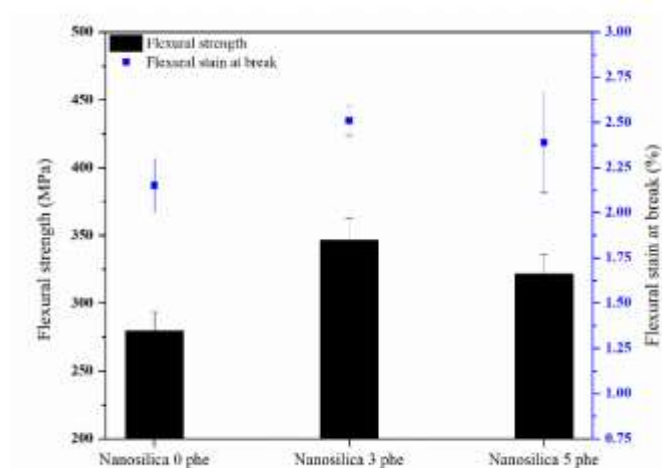


รูปที่ 4.54 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา

#### 4.2.2.2 ความต้านทานต่อการดัดโค้ง

การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอตามมาตรฐาน ASTM D790 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.55 พบว่าค่าความต้านแรงดัดโค้งของคอมโพสิตแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีการแปรปริมาณของนาโนซิลิกามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ไม่เติมนาโนซิลิกา อาจเป็นไปได้ว่าที่อัตราส่วนน้อยกว่า 3 phe ของนาโนซิลิกาไม่เพียงพอต่อการเสริมแรงแก่สมบัติดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของนาโนซิลิกาเป็น 3 phe จะให้ค่าต้านแรงดัดโค้งที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่เติมนาโนซิลิกา

เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของตัวนาโนซิลิกาในเมทริกซ์ได้ดี จึงทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น แม้ความต้านแรงดัดโค้งจะลดลงเมื่อเติมปริมาณนาโนซิลิกามากกว่า 3 phe ซึ่งสามารถอธิบายได้ถึงความสามารถในการต้านแรงดัดลดลง เนื่องจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของอนุภาคนาโนซิลิกา เมื่อใช้ปริมาณมากเกินไปจนส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค

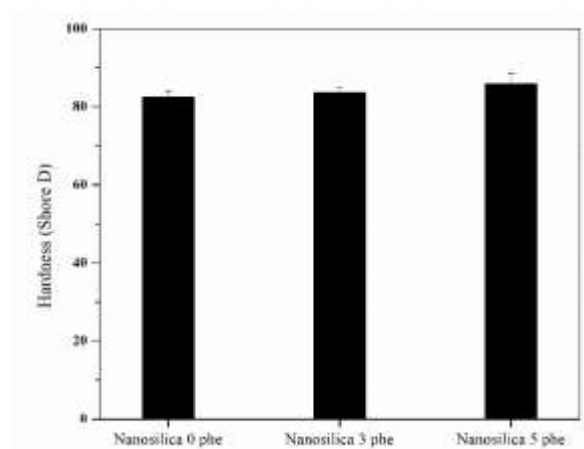


รูปที่ 4.55 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา

#### 4.2.2.3 ความแข็ง

จากการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินโดยแปรปริมาณนาโนซิลิกาเคลือบคอมโพสิตแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกา ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมนาโนซิลิกา โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วง 80-85 Shore D ทั้งนี้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมนาโนซิลิกาซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่เป็นของแข็งลงในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซินทำให้อีพ็อกซีเรซินมีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อขึ้นรูปกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นมีผลให้แบตเตอรี่เกิดการเสีรูปทรงได้ยากยิ่งขึ้น

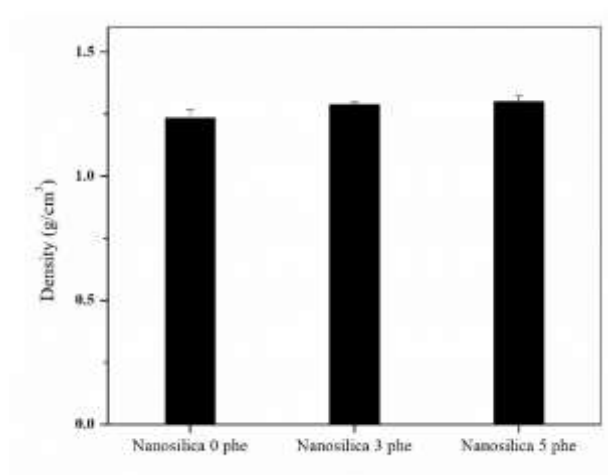




รูปที่ 4.56 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา

#### 4.2.2.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตไฟเบอร์ ที่มีการเติมสารตัวเติมนาโนซิลิกา พบว่าความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้ สามารถยืนยันได้ว่าการเติมยาง ENR และนาโนฟิลเลอร์จะไม่ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น



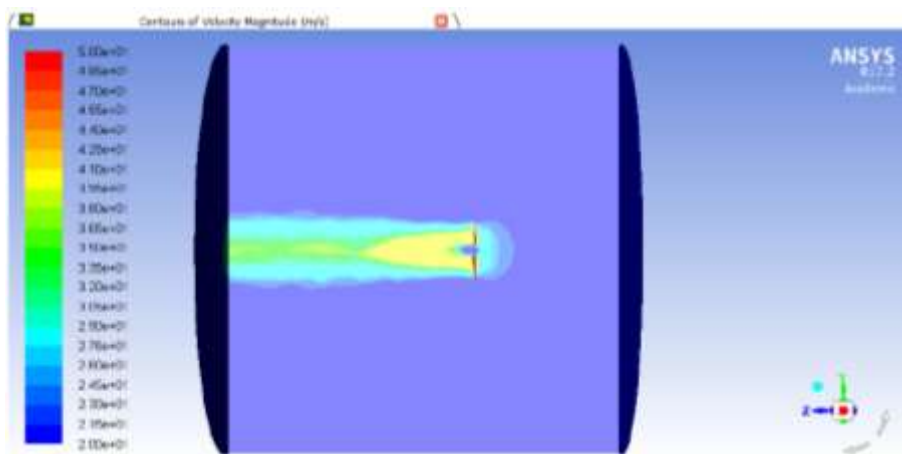
รูปที่ 4.57 ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตที่เติมนาโนซิลิกา

### 4.3 วิเคราะห์การจำลองการทำงานของใบพัด

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ทำการศึกษาการสร้างใบพัดจากใบพัดตัวอย่างที่ได้ศึกษาทำให้ได้รูปแบบของใบพัดในการสร้างเหตุการณ์จำลองการทำงานของใบพัดโดรน ซึ่งผลของการจำลองเหตุการณ์ของใบพัด โดยบินที่ความเร็ว 2000 rpm

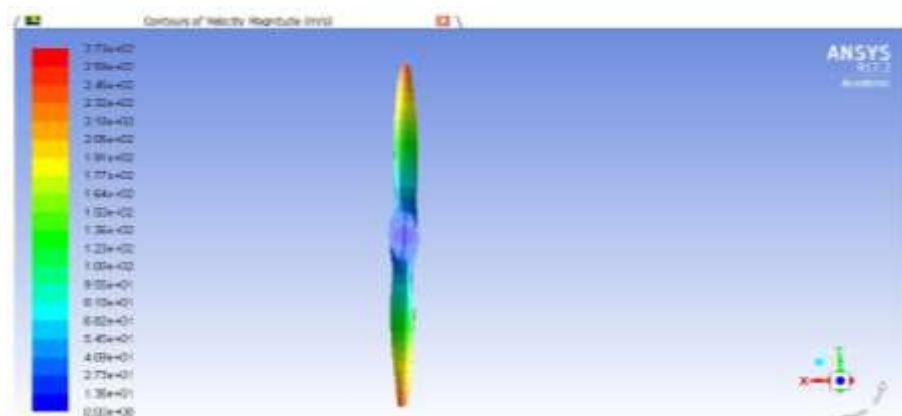
#### 4.3.1 Velocity

ตั้งค่า Auto range เพื่อดูค่าต่ำสุดสูงสุดของ Velocity จากรูปที่ 4.58 จะสังเกตเห็นได้ว่า Profile ของความเร็วจะวิ่งเข้าผ่านใบพัดและถูกดูดทำให้เร็วขึ้น และเนื่องจากการปรับ Auto range จึงทำให้เห็นภาพโดยรวมเป็นมุมกว้าง



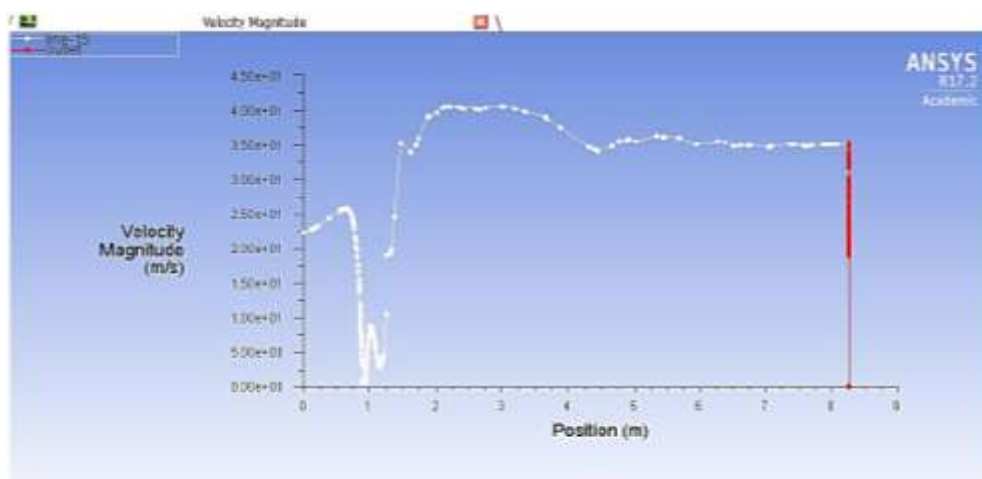
รูปที่ 4.58 Contours ของ velocity ที่จุดกึ่งกลางใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm

จากรูปที่ 4.58 จะทำการปรับ Range เพื่อให้เห็น Profile ของ Velocity ที่ด้านหลังของใบพัดชัดเจนมากขึ้นและทำให้เห็นความต่างที่ชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.59 Contours เฉพาะใบพัดและปรับ Auto range ของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm

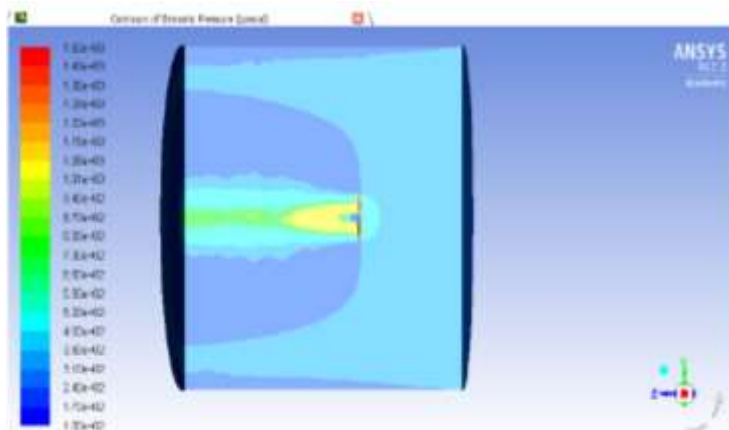
รูปที่ 4.59 จะสนใจเฉพาะใบพัดเพื่อดูว่าบริเวณใดมีความเร็วสูงสุด จากภาพสามารถเห็นได้ว่าบริเวณปลายใบพัดหรือบริเวณที่มีสีแดงจะมีความเร็วสูงสุด ซึ่งความเร็วที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.60 โดยแสดงกราฟแสดงความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของอากาศ โดยวัดจากจุดกึ่งกลางซึ่งนั่นก็คือใบพัด พบว่าความเร็วในช่วงแรกของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าใบพัดจะลดลงก่อนที่จะมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วคงที่ ซึ่งนั่นคือความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากใบพัด



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงความเร็วของใบพัดจากเงื่อนไขใบพัดที่ความเร็ว 2000 rpm

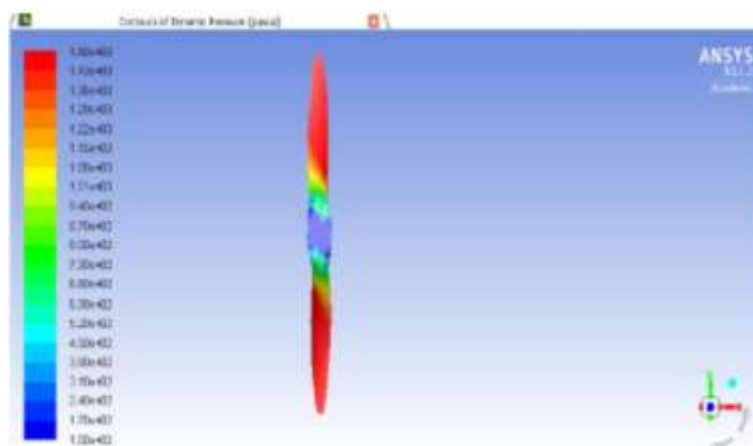
#### 4.3.2. Pressure (dynamic pressure)

ตั้งค่า Auto range ( คือการปรับระยะให้เป็นอัตโนมัติทำให้ทราบถึงค่าที่ต่ำสุดและน้อยสุดของการจำลองเหตุการณ์นั้นๆ) เพื่อดูค่าต่ำสุดสูงสุดของความดัน จากรูปที่ 4.61 จะสังเกตเห็นว่า Profile ของความดันจะวิ่งเข้าผ่านใบพัดและถูกดูดทำให้เร็วขึ้น และเนื่องจากการปรับ Auto range จึงทำให้เห็นภาพโดยรวมเป็นมุมกว้าง



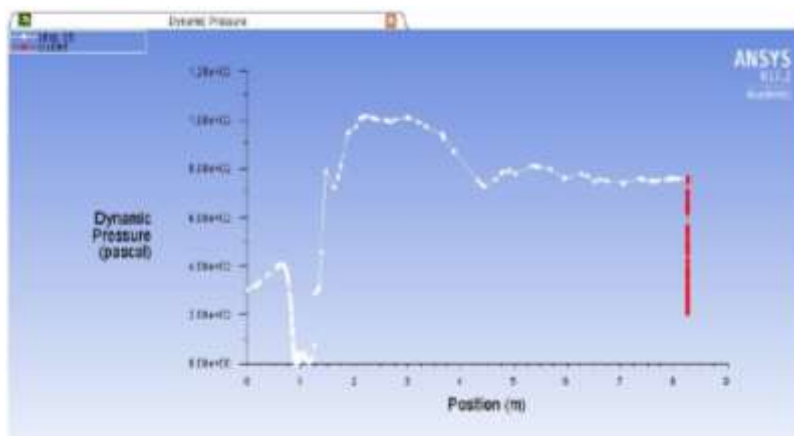
รูปที่ 4.61 Contours ของความดันของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm

รูปที่ 4.61 จะปรับ Range เพื่อให้เห็น Profile ของความดันที่ด้านหลังของใบพัดชัดเจนมากขึ้นและทำให้เห็นความต่างที่ชัดเจน



รูปที่ 4.62 Contours เฉพาะใบพัดและปรับ Auto range

จากรูปที่ 4.62 จะสนใจเฉพาะใบพัดเพื่อดูว่าบริเวณไหนมีความดันสูงสุด จากภาพจะพบว่า บริเวณปลายและตัวของใบพัดจะมีความดันสูงสุด

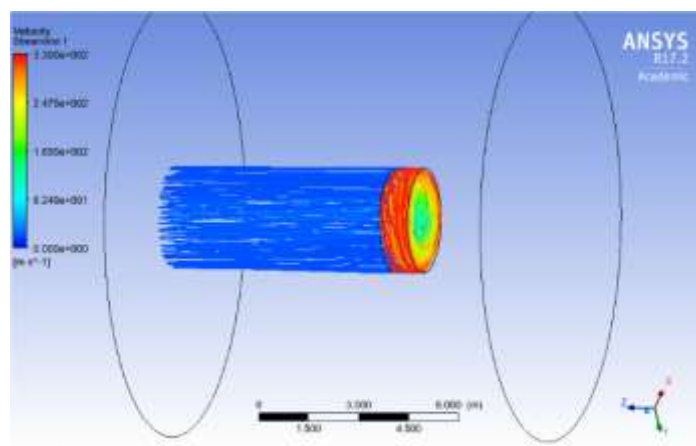


รูปที่ 4.63 กราฟแสดงความดันของใบพัดจากเงื่อนไขบินที่ความเร็ว 2000 rpm

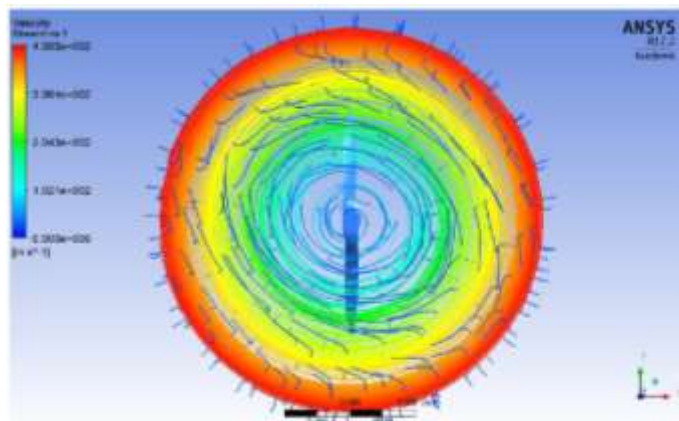
จากรูปที่ 4.63 คือกราฟแสดงความดันที่ทางเข้าและทางออก โดยวัดจากจุดกึ่งกลางซึ่งคือใบพัด จะพบว่าความดันในช่วงแรกของอากาศที่เข้าใบพัดจะลดลงก่อนที่จะมีความดันเพิ่มขึ้นจนคงที่ ซึ่งนั่นคือความดันของอากาศที่ออกจากใบพัด

#### 4.3.3 Stream line Velocity (เส้นทางการไหลของอากาศ)

Stream line คือเส้นทางการไหลของอากาศที่เข้าผ่านใบพัดและออกจากใบพัด โดยรูปที่ 4.60 คือการปรับ Auto range เพื่อให้เห็นภาพโดยรวม



รูปที่ 4.64 แสดง stream line ของความเร็วของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm



รูปที่ 4.65 แสดง stream line ที่หน้าตัดแกน Z ของใบพัดบินที่ความเร็ว 2000 rpm

จากรูปที่ 4.64 จะเห็นได้ว่า stream line ที่ออกจากใบพัดจะมีการหมุนเป็นเกลียวเป็นลักษณะคล้ายสกรูตามหลักทฤษฎี และจากมุมมองนี้ก็จะเห็นความเร็วของการหมุนของใบพัดได้ชัดเจน โดยรูปที่ 4.65 เป็นการปรับค่าแบบ Auto range จะเห็นได้ว่าบริเวณเส้นสีแดงนั้นไม่ได้เกิดจากใบพัด แต่เกิดจากการหมุนของ Rotating Body ที่ทำหน้าที่หมุนแทนใบพัดและทำให้ใบพัดหมุนไปด้วย ซึ่ง stream line ที่เกิดขึ้นนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับพัดแต่บริเวณสีแดงนี้จะมีความเร็วมาก

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ยาง ENR 50 มีความเข้ากันได้ดีกับอีพ็อกซีเรซินโดยให้สมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับยาง ENR 25

5.1.2 ยาง ENR 50 ที่ปริมาณ 5 phe สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินได้ดีที่สุด โดยให้ ความต้านทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้น 50% (14.87 kJ/m<sup>2</sup>) และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น 57% (55 N/mm)

5.1.3 เมื่อศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (นาโนซิลิกาและนาโนเซลลูโลส) พบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 50) ที่ปริมาณ 0.75 phe จะช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 33.33% และช่วยเพิ่มความเสถียรต่อความร้อนแก่วัสดุนาโนคอมโพสิต และเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้นอีกด้วย

5.1.4 เมื่อศึกษาปริมาณที่เติมลงในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR 50) พบว่าการใช้นาโนซิลิกาที่ปริมาณ 3 phe ซึ่งจะให้ความแข็งที่ 81 Shore D, ความต้านทานต่อแรงดึงที่ 48.30 MPa (มีค่าเพิ่มขึ้น 5.8 %) ความต้านทานต่อการกระแทกที่ 15.61 kJ/mm (มีค่าเพิ่มขึ้น 126 %) และความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หลังจากนำไปทดสอบความต้านทานต่อสภาวะการใช้งาน วัสดุนาโนคอมโพสิตที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้น

5.1.5 การขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ พบว่าสูตรที่ได้ปรับปรุงสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานใบพัดอากาศยานไร้คนขับได้ ซึ่งจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยแบบพิมพ์ 3 ชั้นเท่านั้น เมื่อใช้จำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มากกว่า 3 ชั้น พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นใบพัดที่สมบูรณ์ได้

5.1.6 สมบัติของวัสดุที่ใช้ขึ้นใบพัด พบว่าอีพ็อกซีเรซินที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ยาง ENR 50 ร่วมกับสารตัวเติมระดับนาโน (นาโนเซลลูโลส 0.75 และ นาโนซิลิกา 3 phe) สามารถนำมาขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งทั้งสองสูตรจะให้สมบัติความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานต่อการดัดงอ และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่เติมนาโนฟิลเลอร์

5.1.7 ต้นทุนในการผลิตใบพัดโดน 1 ชุด จำนวน 4 ใบ ราคาชุดละ 113 บาท โดยมีรายละเอียดดังนี้ อีพ็อกซีเรซิน 20 กรัม 60 บาท น้ำยา ENR 50 15 กรัม 2.4 บาท นาโนซิลิกา 3 กรัม 30 บาท และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 200 เซนติเมตร ราคา 20 บาท คิดเป็นเงินทั้งหมด 113 บาท

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างแบบจำลองการทำงานของใบพัดควรใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอเพื่อความรวดเร็วในการทำงานและให้ได้ผลที่มีความเหมาะสม ละเอียดและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นควรมีการนำใบพัดไปทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ชัดเจนและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทำ Simulation



## เอกสารอ้างอิง

- [1] อ. ดีอ่อง, "การพัฒนาอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) " พ.ศ. 2558. (สืบค้นเมื่อ 24 ธันวาคม 2558)
- [2] David Sarah, "International Drone Day 2017", April 17, 2017.
- [3] อ. พลเสน, "รู้จักกับอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี" สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2554. (สืบค้นเมื่อ 24 ธันวาคม 2558).
- [4] V. Jaiganesh and S. Manivannan, "Numerical analysis and Simulation of Nylon Composite Propeller for aircraft," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1079-1088, 2014.
- [5] T. Hsieh, A. Kinloch, K. Masania, J. S. Lee, A. Taylor, and S. Sprenger, "The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles," *Journal of materials science*, vol. 45, no. 5, pp. 1193-1210, 2010.
- [6] D. Kotnarowska, "Influence of ultraviolet radiation and aggressive media on epoxy coating degradation," *Progress in Organic Coatings*, vol. 37, no. 3, pp. 149-159, 1999.
- [7] J. Jakobsen, M. Jensen, and J. H. Andreasen, "Thermo-mechanical characterisation of in-plane properties for CSM E-glass epoxy polymer composite materials–Part 1: Thermal and chemical strain," *Polymer Testing*, vol. 32, no. 8, pp. 1350-1357, 2013.
- [8] S. Chuayjuljit, N. Soatthiyanon, and P. Potiyaraj, "Polymer blends of epoxy resin and epoxidized natural rubber," *Journal of applied polymer science*, vol. 102, no. 1, pp. 452-459, 2006.
- [9] S. Suchat and W. Yingprasert, "ECO-Adhesive from Modified Natural Rubber for Wood Applications", *Advanced Materials Research*, Vol. 844, pp. 182-185, 2014.
- [10] N. Pithaksareetham, N. Hongkarnjanakul, and S. Suchat, "Eco-nanocomposites with epoxidized natural rubber for improved mechanical properties essential to

- unmanned aerial vehicles propeller applications," *Advances in Polymer Technology*, vol. 37, pp. 2946-2957, 2018.
- [11] ป. อินทรพัฒน์, "สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล" วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่พิมพ์ 14 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555.
- [12] S. Basu, *Crystalline silicon-properties and uses*. 2011.
- [13] Y. Ikeda and Y. Kameda, "Preparation of "green" composites by the sol-gel process: in situ silica filled natural rubber," *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 31, no. 1-3, pp. 137-142, 2004.
- [14] N. Saba, F. Mohammad, M. Pervaiz, M. Jawaid, O. Alothman, and M. Sain, "Mechanical, morphological and structural properties of cellulose nanofibers reinforced epoxy composites," *International journal of biological macromolecules*, vol. 97, pp. 190-200, 2017.
- [15] ช. จักขุวงศ์, "ส่วนประกอบของโดรน" ค้นจาก <https://www.gqthailand.com/toys/article/drone-item>
- [16] R. F. Anand, and K. K. Bharat, "Design and Analysis of Horizontal tail of UAV using composite materials", *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, vol. 4 no. 7, 2013.
- [17] A. Zom, "Composite Matrix Materials," *Composite Matrix Material Applications*, 2013. สืบค้นจาก <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9814>
- [18] F. A. Nurgasang, S. Wattanasiriwech, D. Wattanasiriwech, and P. Aungkavattana, "Mechanical and physical properties of fly ash geopolymer-mullite composites," *Suranaree Journal of Science & Technology*, vol. 23, no. 1, 2016.
- [19] ก. สุชีวะ, "ยางนาโนคอมโพสิต (Rubber nanocomposite)", สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม , 2558. ค้นจาก <http://rubber.oie.go.th/box/Article/95.pdf>
- [20] A. B. Strong, "Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications", *Society of Manufacturing Engineers*, 2008.

- [21] M. Zarrelli, A. A. Skordos, I. K. Partridge, "Investigation of cure induced shrinkage in unreinforced epoxy resin", *Plastics and Rubber Processing and Application*, vol. 31, pp. 377-384, 2002.
- [22] G. Odegard and A. Bandyopadhyay, "Physical aging of epoxy polymers and their composites," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 49, no. 24, pp. 1695-1716, 2011.
- [23] M.H. Irfan, "Chemistry and technology of thermosetting polymers in construction applications", Boston: Kluwer academic publisher, 1998.
- [24] S.H. Goodman, "Handbook of Thermoset Plastics (Second Edition): Westwood", NJ: William Andrew Publishing, pp. 169-192, 1999a.
- [25] S.H. Goodman, "Handbook of Thermoset Plastics (Second Edition): Westwood", NJ: William Andrew Publishing, pp. 193-268, 1999b.
- [26] S. Jan and W.H. Zhong, "FTIR study of ageing epoxy resin reinforced by reactive graphitic nanofibers", *Journal of applied polymer science*, vol. 106, no. 6, pp. 3555-3563, 2007.
- [27] F. Liu, Z.B. Zhang, L.L. Xu and M.S. Tang, "Study on the Resistance of Ultraviolet Radiation of Composite Materials Based on Epoxy resin", *Journal of advanced materials research*, pp. 812-816, 2011.
- [28] G. Palmese and R. McCullough, "Effect of epoxy-amine stoichiometry on cured resin material properties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 46, no. 10, pp. 1863-1873, 1992.
- [29] ส. ช่วยจุลจิตตร. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [30] ส. สุชาติ. ยางธรรมชาติ:การแปรรูป มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้. 2558.
- [31] จิระศักดิ์ ชัยสนิท, "นาโนเทคโนโลยี", *โครงการฟลิกส์และวิศวกรรม* 2549.

- [32] F.L. Jin and S.J. Park, "Interfacial toughness properties of trifunctional epoxy resins/calcium carbonate nanocomposites", *Materials Science and Engineering Part A*, vol. 475, pp. 190-193, 2008.
- [33] S. H. Kim, W. I. Lee and J. M. Park, "Assessment of dispersion in carbon nanotube reinforced composites using differential scanning calorimetry", *Carbon*, vol. 47, pp. 2699-2703, 2009.
- [34] P. B. Kohn and R.A. Pearson, "Rheological behavior of nanosilica filled epoxies", *Undergraduate Research Symposium Winning Posters*. Vol. 24, 2011.
- [35] P. B. Messersmith and E. P. Giannelis, "Synthesis and Characterization of Layered Silicate-Epoxy Nanocomposites", *Chemistry of Materials*, vol. 6, pp. 1719-1725, 1994.
- [36] T. Lan, P.D. Kaviratna and T.J. Pinnavaia, "Mechanism of Clay Tactoid Exfoliation in Epoxy-Clay Nanocomposites", *Chemistry of Materials*, vol. 7, pp. 2144-2150, 1995.
- [37] E. Bozkurt, E. Kaya and M. Tanoğlu, "Mechanical and thermal behavior of non-crimp glass fiber reinforced layered clay/epoxy nanocomposites", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 3394-3403, 2007.
- [38] V. Jaiganesh, and S. Manivannan, "Numerical Analysis and Simulation of Nylon Composite Propeller for Aircraft", *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1079-1088, 2014.
- [39] C. M. Vu, T. V. Nguyen, L.T. Nguyen and H. J. Choi, "Fabrication of adduct filled glass fiber/epoxy resin laminate composites and their physical characteristics", *Polymer Bulletin*, Vol. 73, no. 5, pp 1373–1391, 2016.
- [40] A. B. B. Saleh, Z. A. M. Ishak, A. S. Hashim, W. A. Kamil and U. S. Ishiaku, "Synthesis and Characterization of Liquid Natural Rubber as Impact Modifier for Epoxy Resin", *Physics Procedia*, vol. 55, pp. 129-137, 2014.

- [41] S.-G. Hong and C.-K. Chan, "The curing behaviors of the epoxy/dicyanamide system modified with epoxidized natural rubber", *Thermochimica Acta*, vol. 417, pp. 99-106, 2004.
- [42] L. Y. Seng, S. Ahmad, R. Rasid, S. Y. E. Noum, Y. C. Hock and M. A. Tarawneh, "Effects of liquid natural rubber (LNR) on the mechanical properties of LNR toughened epoxy composite", *Sains Malaysiana*, 40(7), 679-683, 2011.
- [43] ด. ลี, "การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/มอนต์-มอริลโลไนต์คอมโพสิต", *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2558.
- [44] ส. ก้องพารากุล, "การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/มอนต์มอริลโลไนต์คอมโพสิต", *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 หน้าที่ 224-233, 2008.
- [45] พ. แซ่ฮุย, "สารเคมียาง", สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, หน้าที่ 86-92, 2550.
- [46] S. Kohjiya and Y. Ikeda. "In situ formation of particulate silica in natural rubber matrix by the sol-gel reaction." *Journal of sol-gel science and technology* vol. 26, no. 1-3, pp. 495-498, 2003.
- [47] B. Norkrans, "Cellulose and cellulolysis", *Advances in Applied Microbiology*, Vol. 9, 1967.
- [48] L. Prosky and J.W DeVries, "Controlling dietary fiber in food products", 1992.
- [49] L. Charles, A. Peter, and H. Brewer, "Solution studies of cellulose in lithium chloride and N,N-dimethylacetamide", *Macromolecules*, vol. 18 no. 12, pp 2394-2401, 1985.
- [50] R. Ikeda, M. Cha, J. Ling, Z. Jia, D. Coyle and J. G.Gu, "Merkel Cells Transduce and Encode Tactile Stimuli to Drive A $\beta$ -Afferent Impulses", *Cell*, Vol. 157, no. 3, pp. 664-675, 2014.

- [51] I. J. MoránVera, A. Alvarez, P. V. Cyras, "Analia Vázquez, Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers", *Cellulose*, Vol. 15, no. 1, pp. 149–159, 2008.
- [52] U. Meier, "Carbon fiber-reinforced polymers: modern materials in bridge engineering," *Structural engineering international*, vol. 2, no. 1, pp. 7-12, 1992.
- [53] Epotec, "Composite Applications Epotec Epoxy Systems", Aditya Birla Chemicals (Thailand), 2014. Ltdwww. Epotec.info, (สืบค้นเมื่อ 7 พฤศจิกายน 2561)
- [54] D. Gautam and K. Niranjana, "Thermostable and flame retardant Mesua ferrea L. seed oil based non-halogenated epoxy resin/clay nanocomposites", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 69, no. 4, pp. 495-503, 2010.
- [55] F.-L. Jina and S.J. Park, "Improvement in fracture behaviors of epoxy resins toughened with sulfonated poly(ether sulfone) ", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, no. 3, pp. 509-514, 2007.
- [56] J. Massam and J. Pinnavaia, "Clay Nanolayer Reinforcement of a Glassy Epoxy Polymer", (Symposium P – Nanostructured Powders & Their Industrial Application), vol. 520, 1998.
- [57] P.L.N. Raju, C. Gupta, V. Saikhom, S. Pandit, A. Qadir, P.S. Singh, D. Chutia, B.K. Handique and J. Goswami, "NEW INITIATIVE OF UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) EMERGING TECHNOLOGY APPLICATIONS IN NORTH EAST FOR CAPACITY BUILDING AND OUTREACH ACTIVITIES OF NORTH EASTERN SPACE APPLICATIONS CENTRE", *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018.
- [58] B.M. Madhusudhan and P. V. Srihari, "Design and Analysis of Composite Propeller Blade for Aircraft". *Engineering research and applications*, pp.2248-9622, 2014.
- [59] Saleh, A. B. B., Ishak, Z. A. M., Hashim, A. S., Kamil, W. A. and Ishiaku, U. S. 2014. Synthesis and Characterization of Liquid Natural Rubber as Impact Modifier for Epoxy Resin. *Physics Procardia*, vol. 55, pp. 129-137.
- [60] S. K. Tan, S. Ahmad, C. H. Chia, A. H. Mamun and P. Heim, "A Comparison Study of Liquid Natural Rubber (LNR) and Liquid Epoxidized Natural Rubber (LENR) as

- the Toughening Agent for Epoxy", American Journal of Materials Science, vol. 3, no. 3, pp. 55-61, 2013.
- [61] M.H. Kothmann, R. Zeiler, A. R. Anda, A. Brückner and V. Altstadt, "Fatigue crack propagation behaviour of epoxy resins modified with silica-nanoparticles", Polymer, vol. 60, pp.157-163, 2015.
- [62] Y. Ikeda and Y. Kameda, "Preparation of "Green" Composites by the Sol-Gel Process: In Situ Silica Filled Natural Rubber", Journal of Sol-Gel Science and Technology, Vol. 31, pp. 137–142, 2004.
- [63] P. Sae-Oui, C. Sirisinha, K. Hatthapanit, and U. Thepsuwan, "Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system", Polymer Testing, vol. 24, pp. 439-446, 2005.
- [64] K. Murakami, S. Iio and Y. Ikeda, "Effect of silane-coupling agent on natural rubber filled with silica generated in situ", Journal of Materials Science, Vol. 38, no. 7, pp. 1447–1455, 2003.
- [65] Y. Chen, Z. Peng, L. X. Kong, M. F. Huang, and P. W. Li, "Natural rubber nanocomposite reinforced with nano silica", Polymer Engineering & Science, vol. 48, pp. 1674-1677, 2008.
- [66] M. Lay, A. R. Azura, N. Othman, Y. Tezuka, and C. Pen, "Effect of Nanosilica Fillers on the Cure Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Composites", Advanced Materials Research, vol. 626, pp. 818-822, 2012.
- [67] A. A. Zhang , S. Dehghani, S. Richard and Blackburn. 2008. "IR study on hydrogen bonding in epoxy resin–silica nanocomposites", Progress in Natural Science vol. 18, pp. 801–805,
- [68] S. Poompradub, M. Thirakulrati and P. Prasassarakich, "In situ generated silica in natural rubber latex via the sol–gel technique and properties of the silica rubber composites", Materials Chemistry and Physics, vol.144, pp. 122-131, 2014.
- [69] กนกวรรณ มหารัชฌมงคล. การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยไซเลนเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร. ปีการศึกษา 2558

- [70] N.Saba, F.Mohammad, M.Pervaizc, M.Jawaida, O.Y. Alothmand and M. Sain, "Mechanical, morphological and structural properties of cellulose nanofibers reinforced epoxy composites", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 97, pp. 190-200, 2017.
- [71] A. Omrania, L.C.Simon and A.A. Rostami, "Influences of cellulose nanofiber on the epoxy network formation", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 490, no.1-2, pp. 131-137, 2008.
- [72] A. Mihranyan, "Viscoelastic properties of cross-linked polyvinyl alcohol and surface-oxidized cellulose whisker hydrogels", *Cellulose*, Vol. 20, no. 3, pp 1369-1376, 2013.
- [73] S. Vasanthkumar, S. Vancheesan, J. Rajaram and J. C. Kuriacose, "Kinetic studies on the homogeneous hydrogenation of fumaric and maleic acid catalysed by (dimethylglyoximato)cobalt(II) ", *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Chemical Sciences*, Vol. 93, no. 2, pp. 73-81, 1984.
- [74] P. Phinyocheep, "Chemical modification of natural rubber (NR) for improved performance," in *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber*: Elsevier, 2014, pp. 68-118.
- [75] A. Thitithammawong, J. W. Noordermeer, A. Kaesaman, and C. Nakason, "Influence of compatibilizers on the rheological, mechanical, and morphological properties of epoxidized natural rubber/polypropylene thermoplastic vulcanizates," *Journal of applied polymer science*, vol. 107, no. 4, pp. 2436-2443, 2008.
- [76] S. Y. Davydov, A. Lebedev, and N. Y. Smirnova, "Development of a model of silicon carbide thermodestruction for preparation of graphite layers," *Physics of the Solid State*, vol. 51, no. 3, pp. 481-484, 2009.
- [77] C. Andres, N. Spetseris, J. Norton, and A. Meyers, "Non-metallocatalyzed epoxidation of chiral unsaturated lactams by tertiary amine N-oxides," *Tetrahedron letters*, vol. 36, no. 10, pp. 1613-1616, 1995.



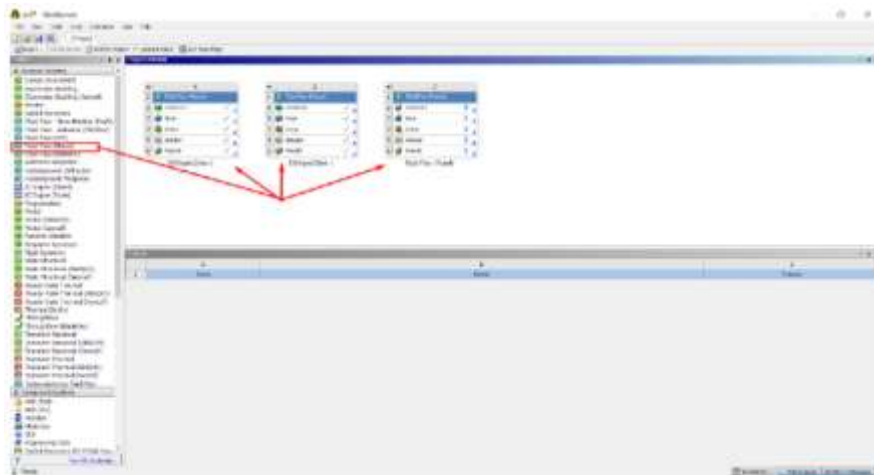
- [78] V. Jafari and A. Allahverdi, "Synthesis and characterization of colloidal nanosilica via an ultrasound assisted route based on alkali leaching of silica fume," *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 10, no. 3, pp. 145-152, 2014.
- [79] V. Hospodarova, E. Singovszka, and N. Stevulova, "Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials," *American Journal of Analytical Chemistry*, vol. 9, no. 06, p. 303, 2018.
- [80] H. Dannenberg and W. Harp, "Determination of cure and analysis of cured epoxy resins," *Analytical Chemistry*, vol. 28, no. 1, pp. 86-90, 1956.
- [81] M. H. Gabr, N. T. Phong, K. Okubo, K. Uzawa, I. Kimpara, and T. Fujii, "Thermal and mechanical properties of electrospun nano-celulose reinforced epoxy nanocomposites," *Polymer Testing*, vol. 37, pp. 51-58, 2014.
- [82] H. Rahmani, S. H. M. Najafi, S. Saffarzadeh-Matin, and A. Ashori, "Mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites: Effects of number of plies, fiber contents, and angle-ply layers," *Polymer Engineering & Science*, vol. 54, no. 11, pp. 2676-2682, 2014.
- [83] G.-Y. Zhao and H.-L. Li, "Electrochemical oxidation of methanol on Pt nanoparticles composited MnO<sub>2</sub> nanowire arrayed electrode," *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 10, pp. 3232-3235, 2008.

ภาคผนวก

## การสร้างการจำลองการทำงานของใบพัดในโปรแกรม Ansys

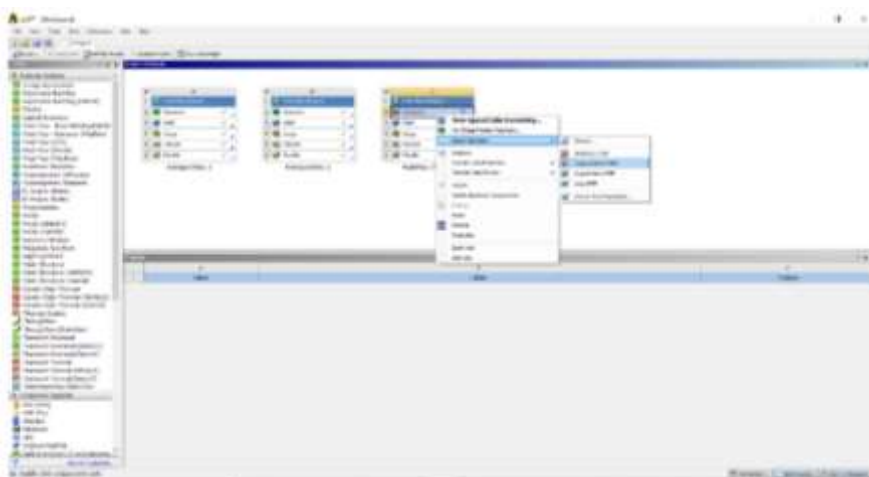
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีการศึกษาการสร้างการจำลองการทำงานของใบพัดในโปรแกรม Ansys ซึ่งมีขั้นตอนการทำดังต่อไปนี้

1. เข้าโปรแกรม Ansys โหมด Fluid flow (fluent)



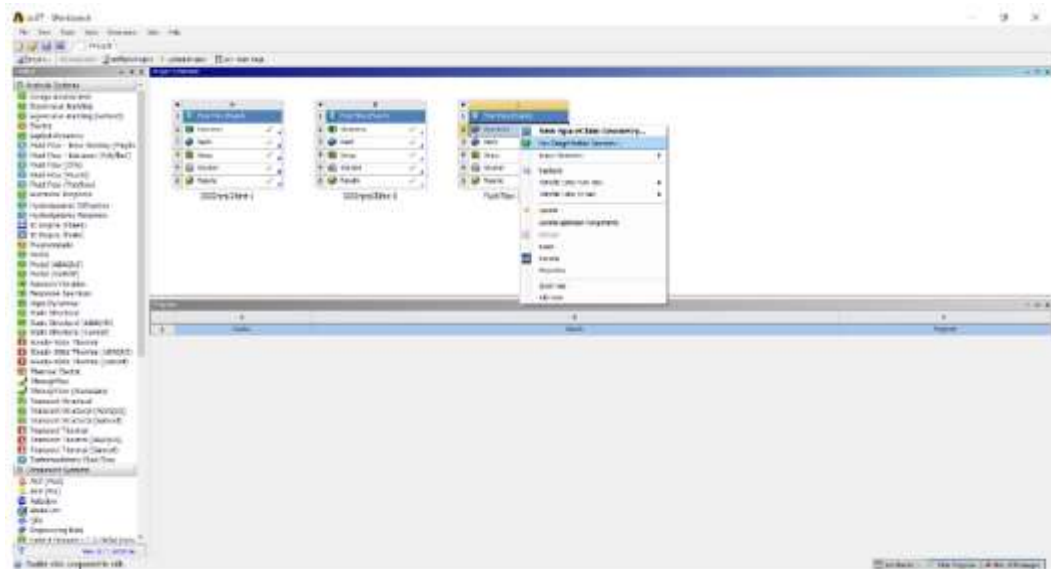
รูปที่ 3.2 การเข้าโปรแกรม Ansys โหมด Fluid Flow (Fluent)

2. คลิกขวา Geometry >> Import Geometry (ต้องเป็นไฟล์ Step)



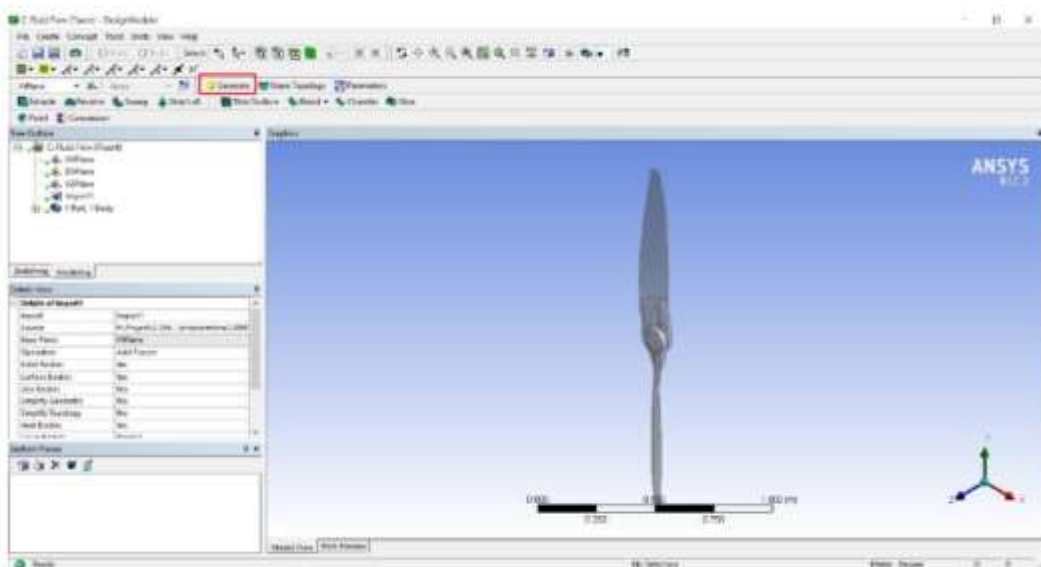
รูปที่ 3.2 การ Import Geometric

### 3. คลิกขวา Geometry >> Edit Geometry in Design Modeler



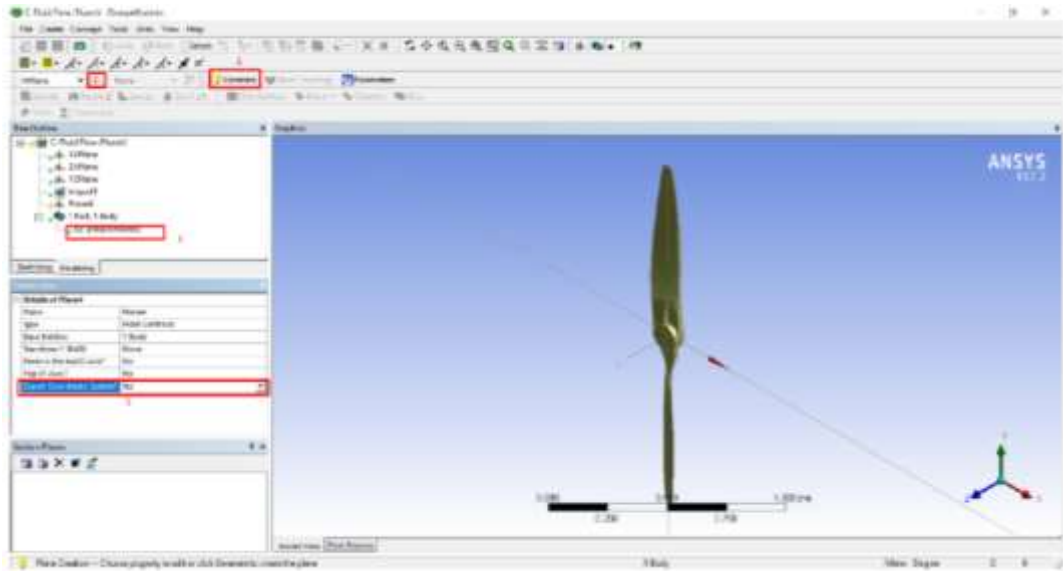
รูปที่ 3.3 การ Edit Geometry in Design Modeler

### 4. สร้าง Rotating body ครอบใบพัด



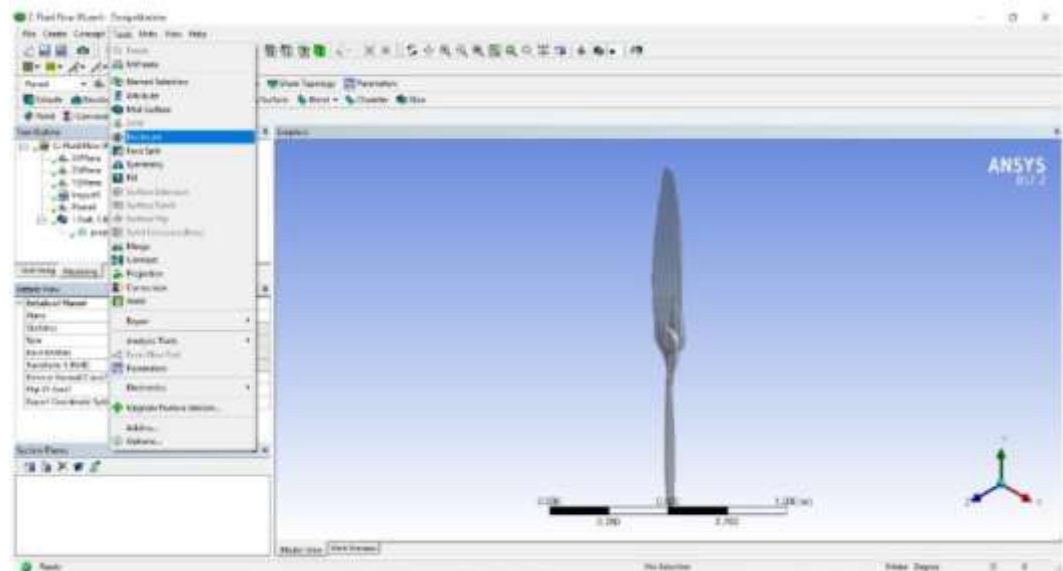
รูปที่ 3.4 การ Generate เพื่อนาใบพัดเข้ามา

## 5. สร้าง Enclosure สำหรับ propeller domain



รูปที่ 3.5 การสร้างแกนของใบพัด

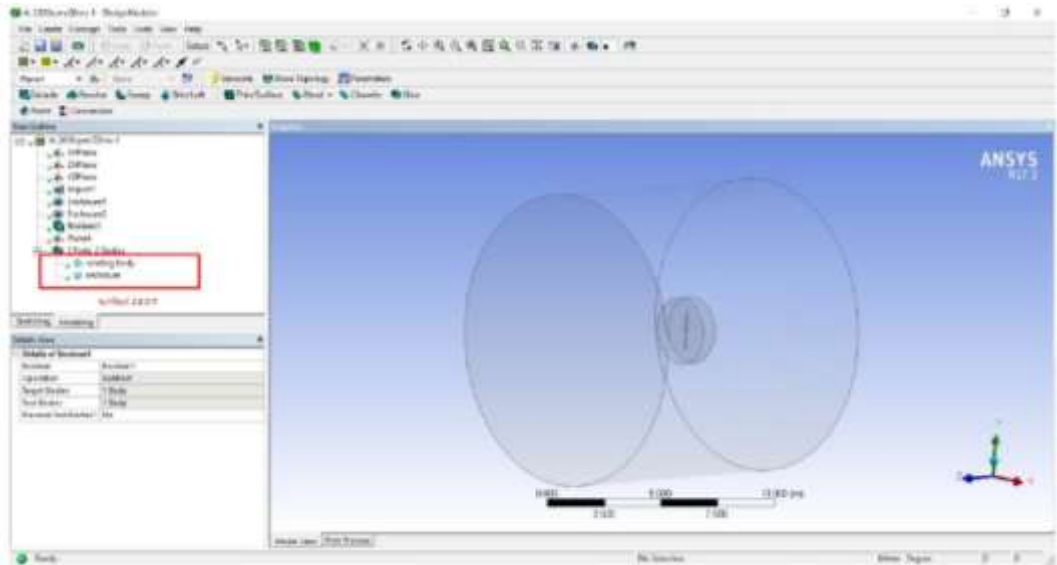
## 6. สร้าง Rotating body และ Enclosure สำหรับ propeller domain



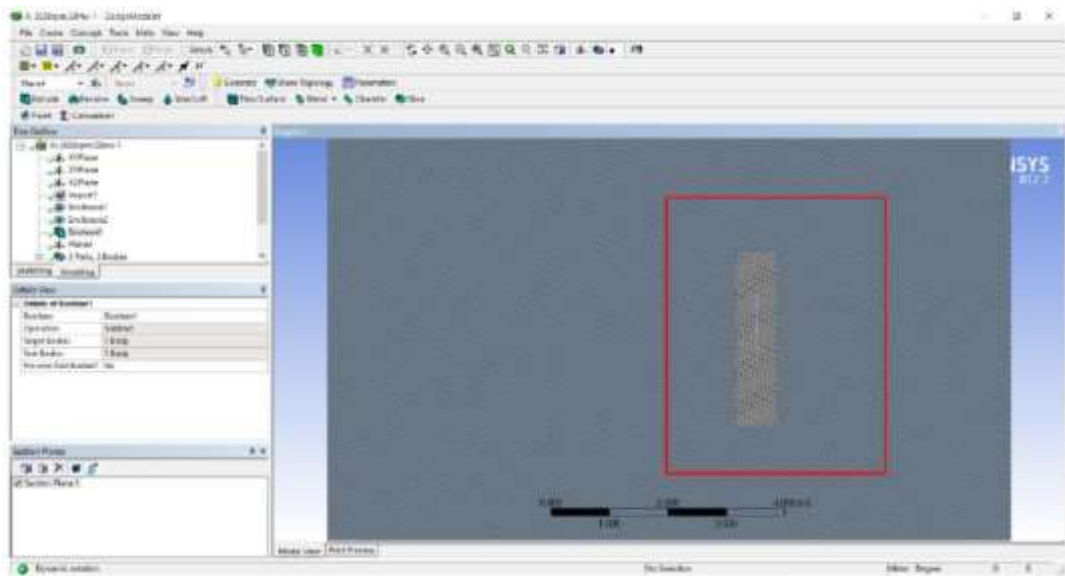
รูปที่ 3.6 การสร้าง Rotating body และ Enclosure



9. Boolean >> Subtract >> Target Bodies เป็น Rotating body >> Tool Bodies เป็น propeller เมื่อผ่าดูข้างในจะได้ดังภาพที่ 3.10 เป็นการเอา solid ออก เหลือแต่ fluid



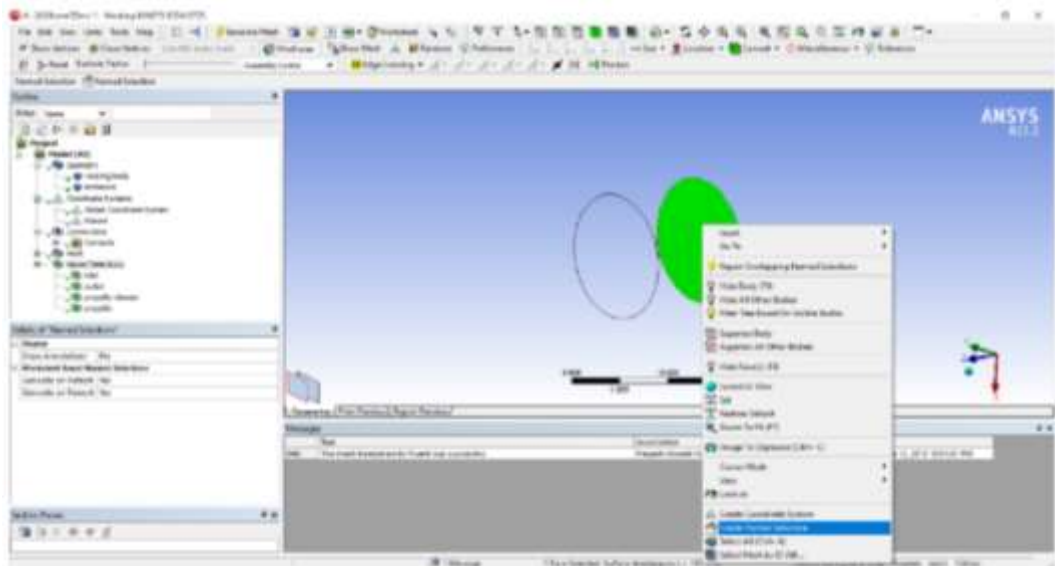
รูปที่ 3.9 การ Boolean



รูปที่ 3.10 การผ่าดูข้างในเอา solid ออก เหลือแต่ fluid

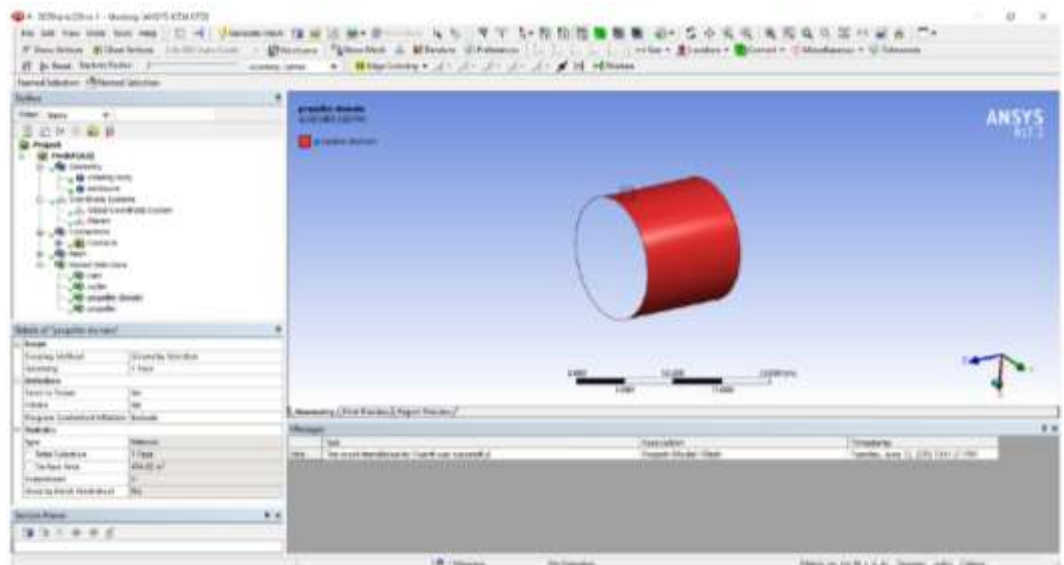
10. การตั้ง Name Selection >> คลิกขวาจุดที่เราต้องการตั้งชื่อ >> Name Selection ตั้งชื่อ เพื่อตั้ง boundary condition สำหรับ set up

### 10.1 รูปแรก inlet



รูปที่ 3.11 การตั้งชื่อใน inlet

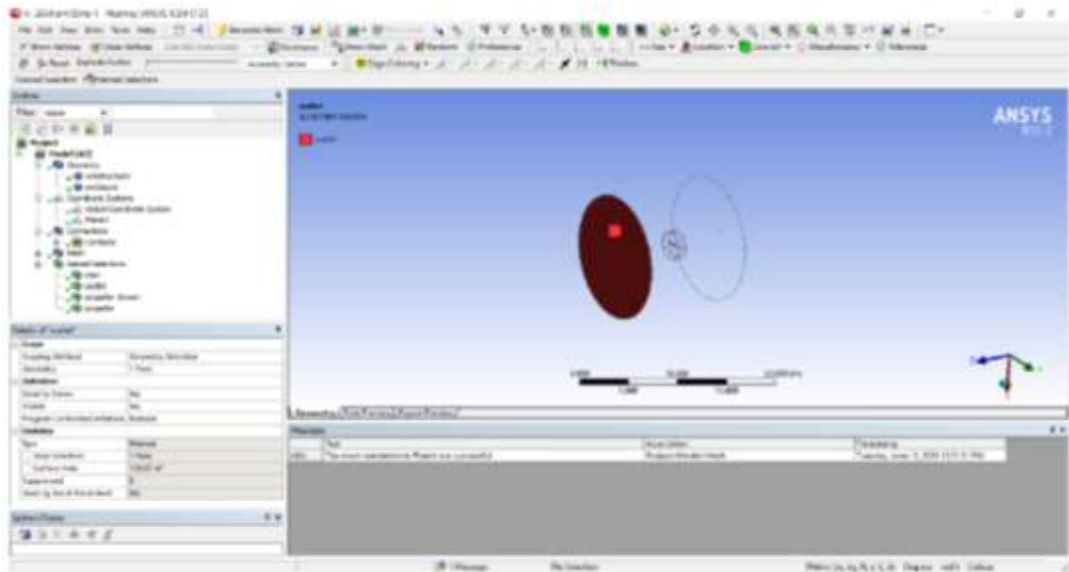
### 10.2 รูปสอง outlet



รูปที่ 3.12 การตั้งชื่อใน outlet

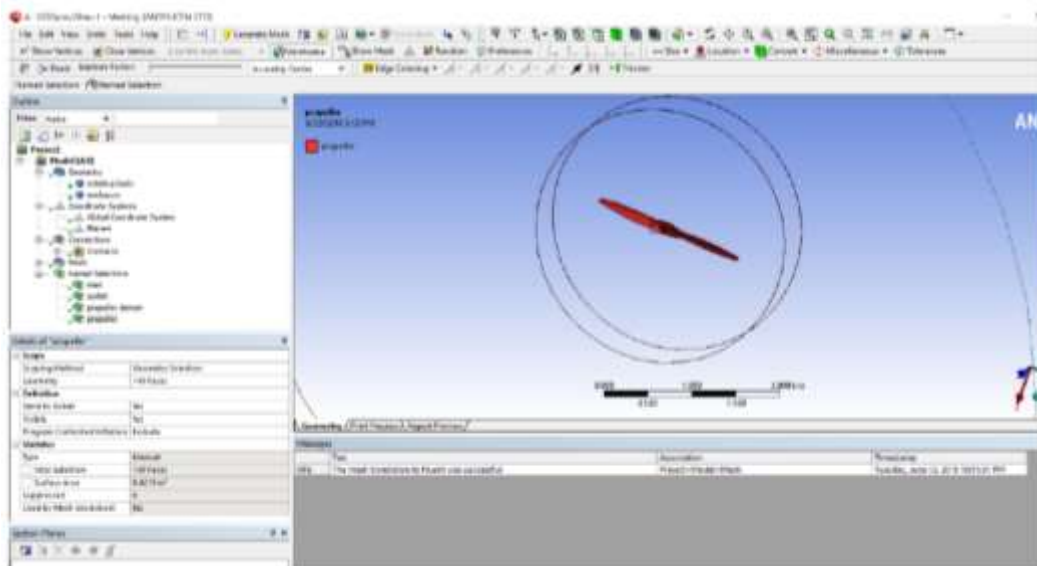


### 10.3 รูปสาม propeller domain



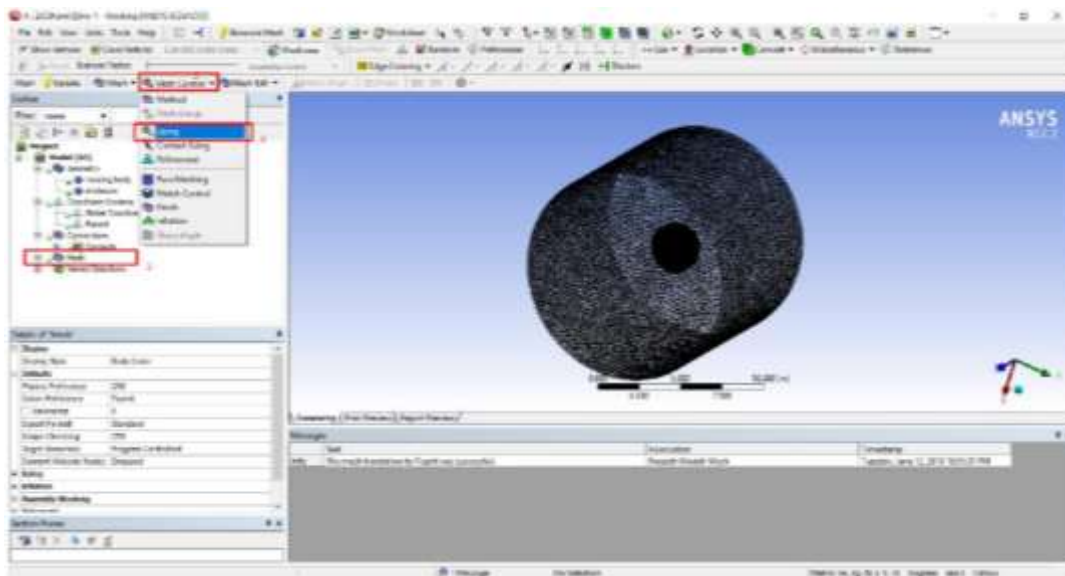
รูปที่ 3.13 การตั้งชื่อ propeller domain

### 10.4 รูปที่สี่ propeller



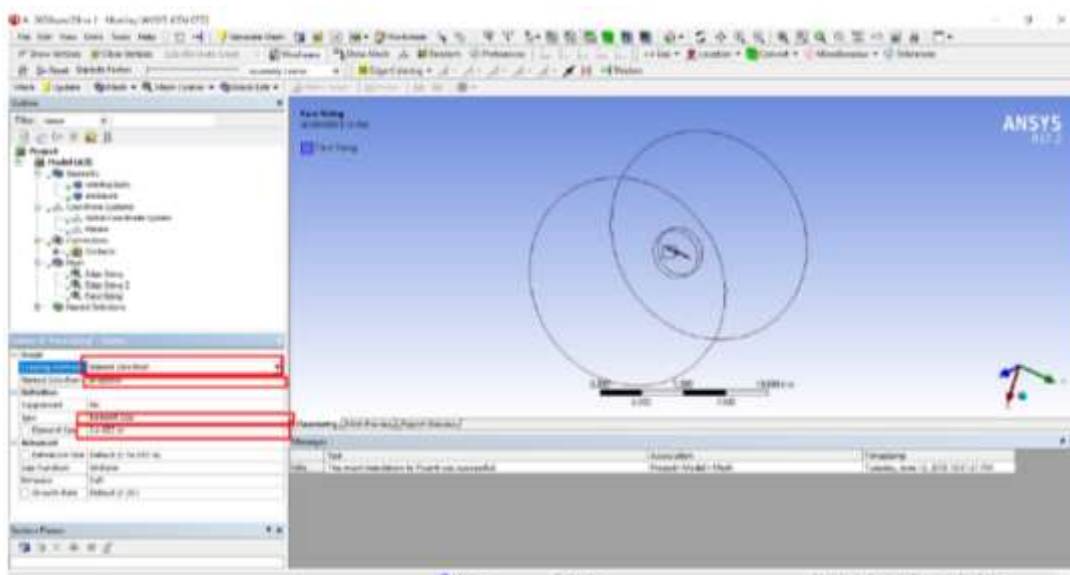
รูปที่ 3.14 การตั้งชื่อ propeller

11. Mesh >> คลิก Mesh >> คลิก Mesh Control >> คลิก Sizing เพื่อกำหนดความละเอียดของใบพัด



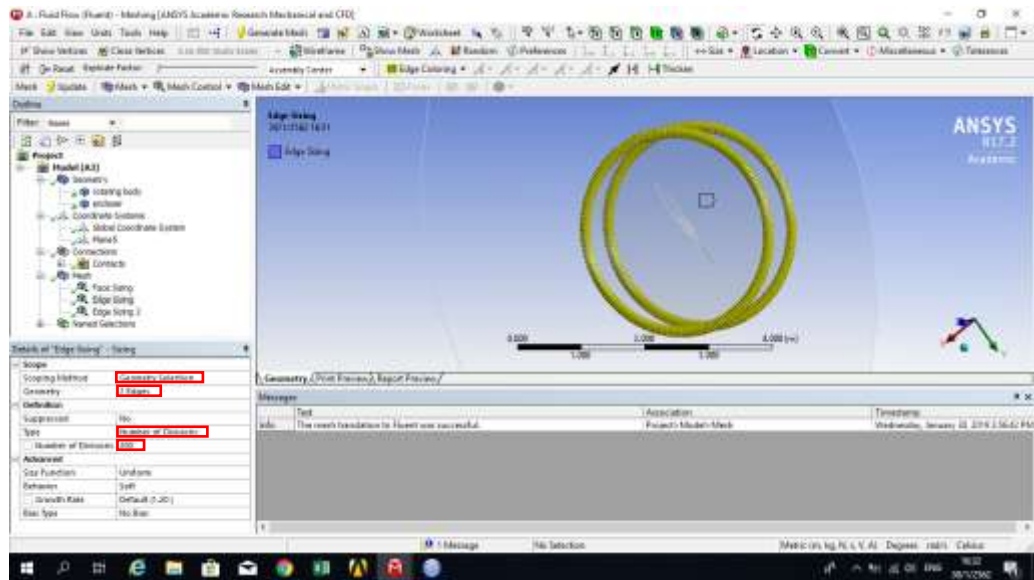
รูปที่ 3.15 การ Mesh ชิ้นงาน

11.1 Face sizing ของ propeller



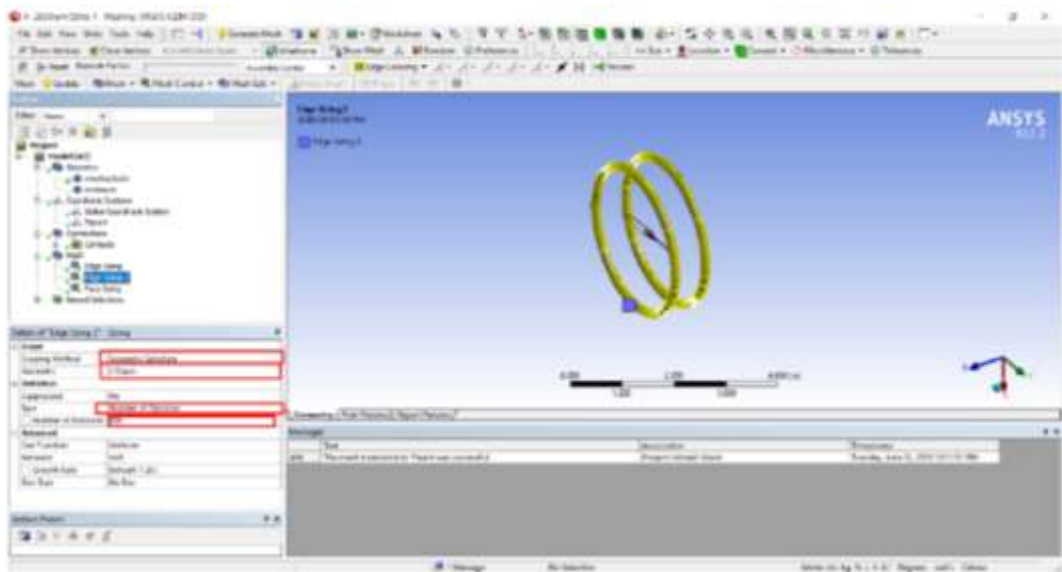
รูปที่ 3.16 การ Mesh ของ propeller โดยใช้ Face sizing

11.2 Edge sizing ของ Enclosure (ปรับตามความเหมาะสม)



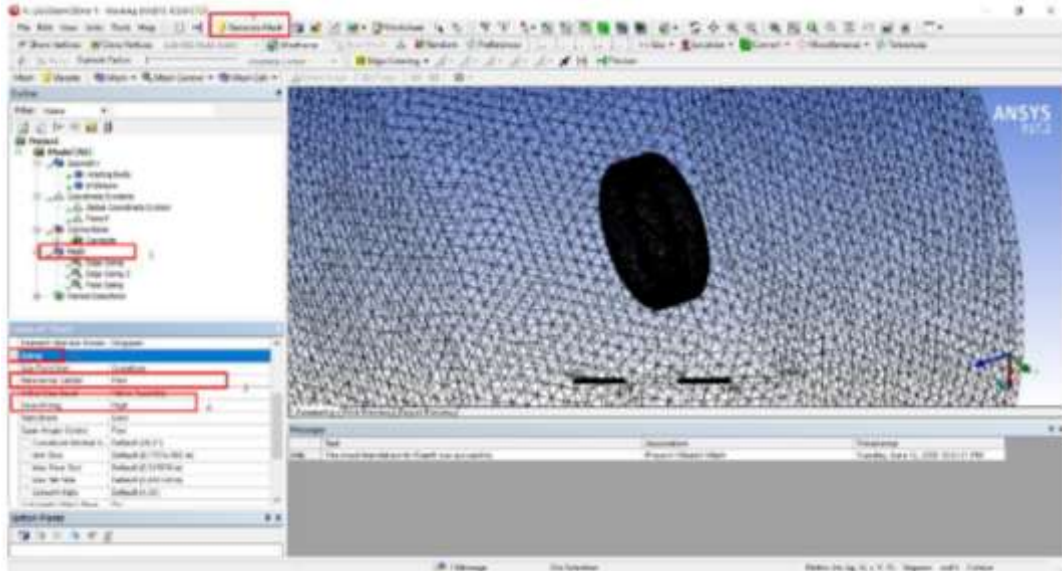
รูปที่ 3.17 การ Mesh ของ Enclosure โดยใช้ Edge sizing

### 11.3 Edge sizing ของ Rotating body (ปรับตามความเหมาะสม)



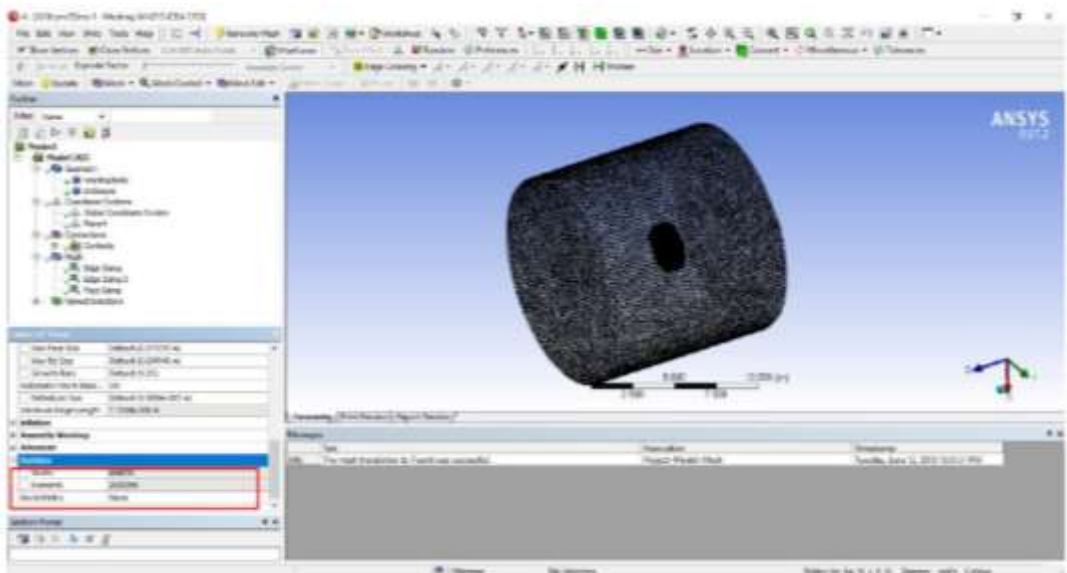
รูปที่ 3.18 การ Mesh ของ Rotating body โดยใช้ Edge sizing

#### 11.4 ตั้งค่าการ Mesh ทำตามขั้นตอนดังรูป



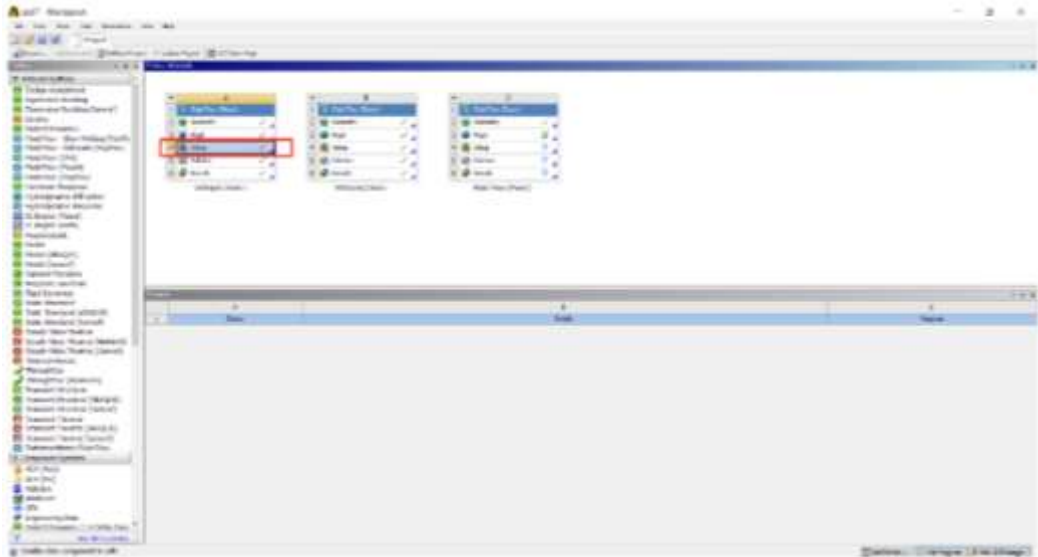
รูปที่ 3.19 การตั้งค่าในการ Mesh

#### 11.5 Mesh เสร็จสิ้น



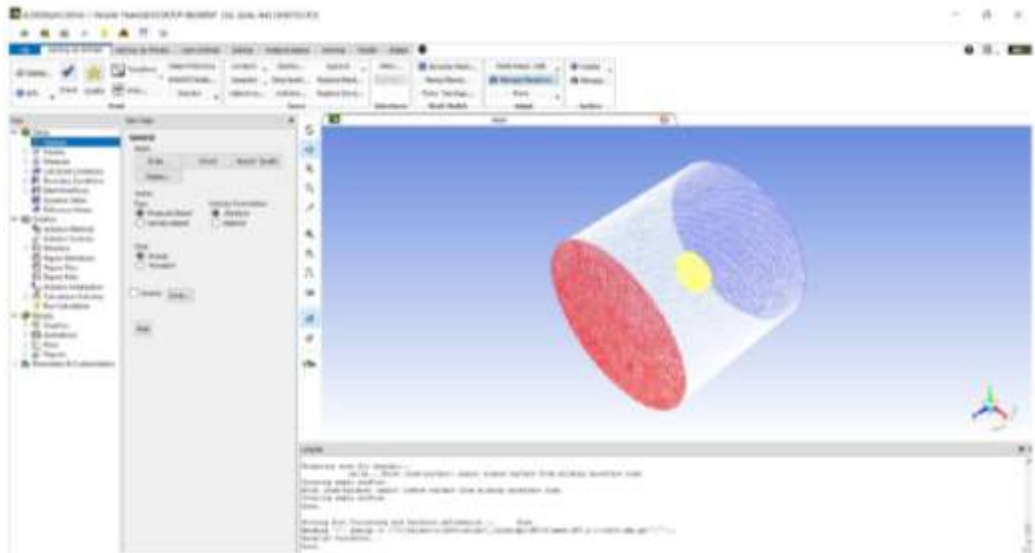
รูปที่ 3.20 การ Mesh เสร็จสิ้น

## 12. Set up ดับเบิลคลิก Set up



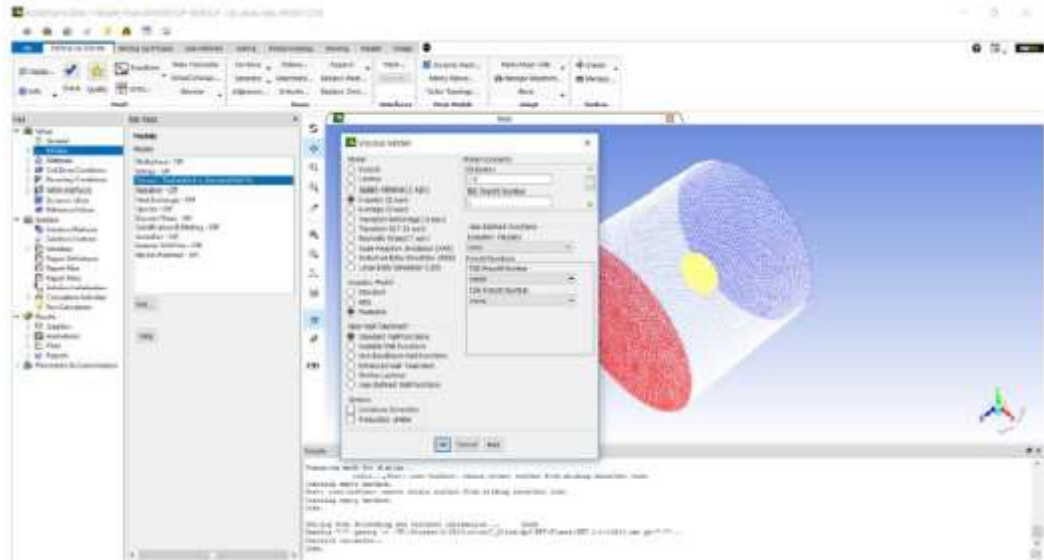
รูปที่ 3.21 การ set up

### 12.1 General



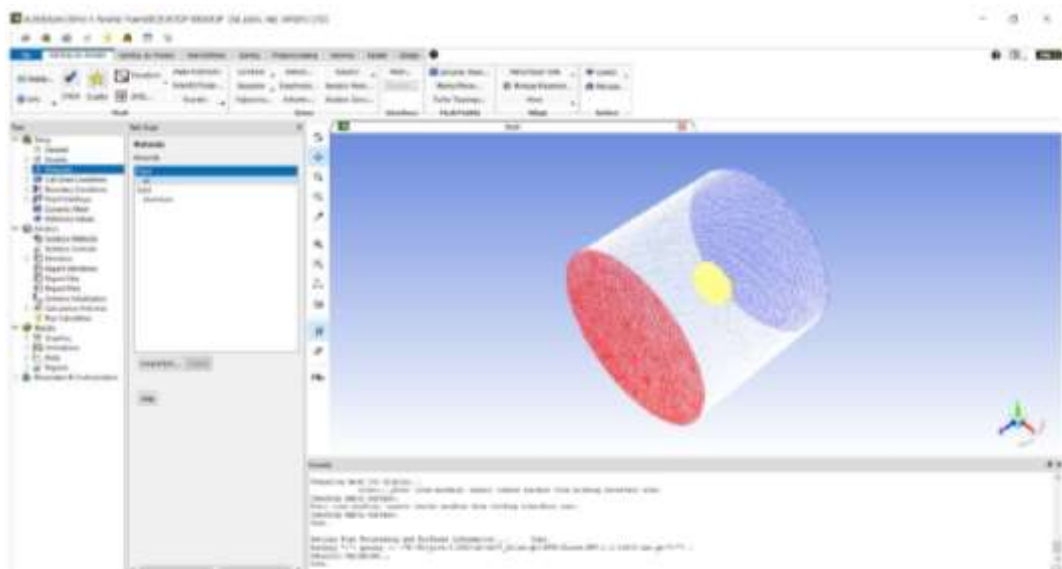
รูปที่ 3.22 การ General

## 12.2 Model



รูปที่ 3.23 การเลือก model

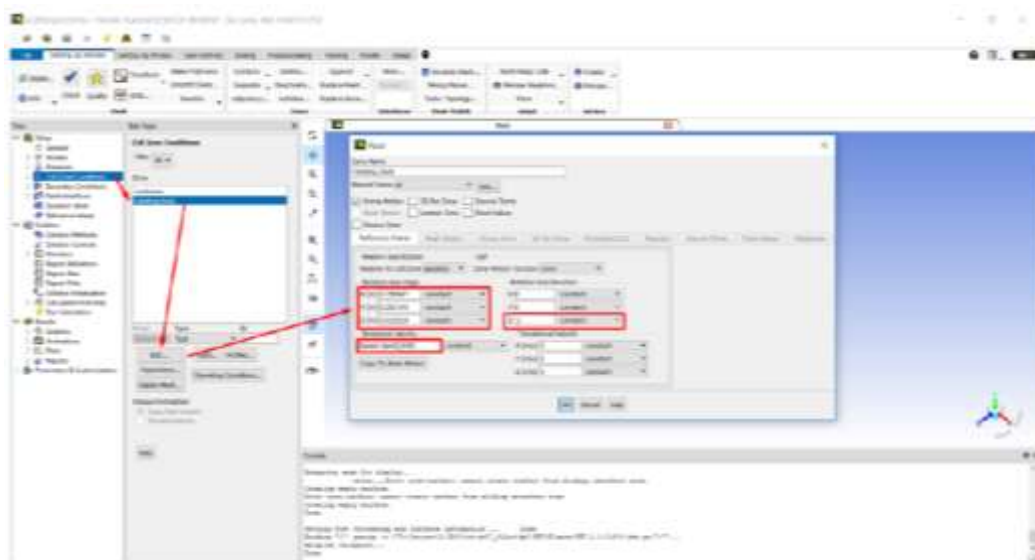
## 12.3 Materials



รูปที่ 3.24 การเลือก Materials



12.4 Cell Zone Condition (Origin ตั้งตามแกน ดูค่าได้ที่ Mesh) (หน่วยของ speed เปลี่ยนได้ที่ Units)



รูปที่ 3.25 การเลือก Cell Zone Condition

12.5 Boundary Condition

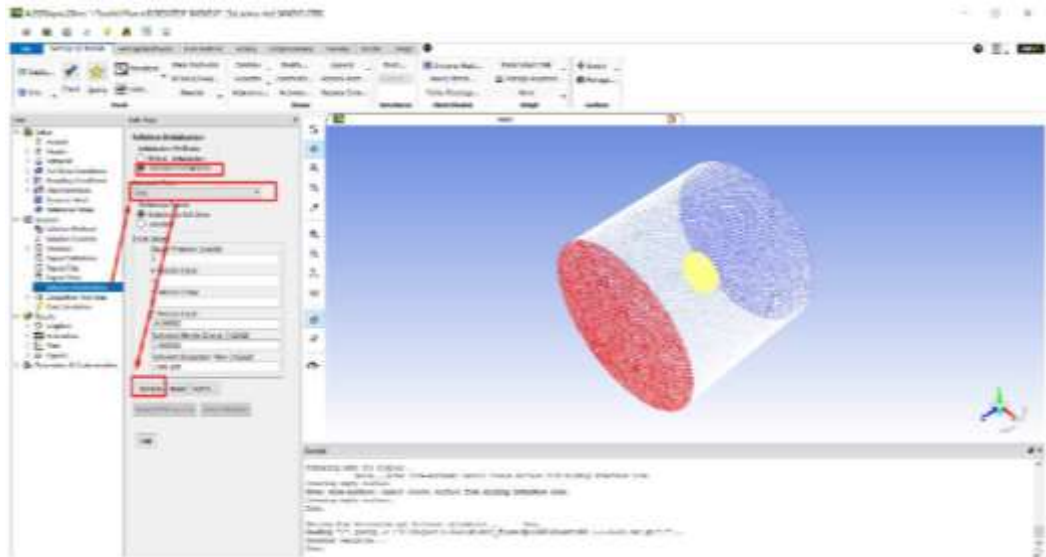


รูปที่ 3.26 การเลือก Boundary Condition





## a. Solution Initialization



รูปที่ 3.29 การเลือก Solution Initialization

## 13. Run simulation

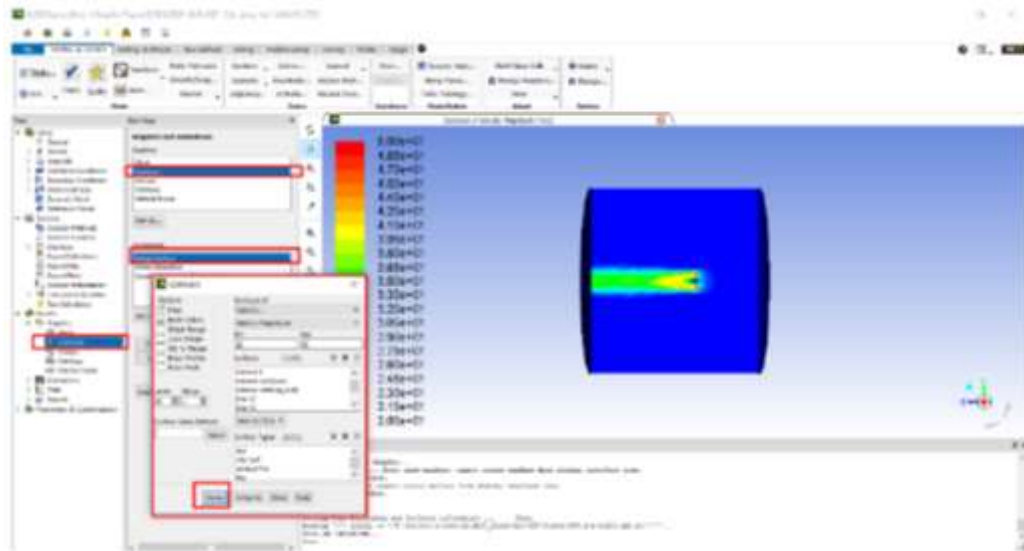
Run Calculation (iteration ปรับไปจนกว่าจะ Steady ในภาพที่ 3.31 คือ Steady ที่ 1600 ก็สามาร stop ได้)



รูปที่ 3.30 การ Run Calculation

## 14. Result

ดู Result ใน Simulation ปรับดูได้ตามต้องการ



รูปที่ 3.31 การดู Result ใน simulation

### มาตรฐานคอมโพลีไบบัตโตรน

1. คุณลักษณะที่ต้องการ
  - 1.1 ลักษณะทั่วไป
 

พื้นผิวของชิ้นงานต้องมีผิวเรียบ มีความมันวาว ต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าว
  - 1.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength)
 

ความต้านทานต่อแรงกระแทกไม่น้อยกว่า 15 kJ/m<sup>2</sup>
  - 1.3 ความแข็ง (Hardness)
 

ความแข็งไม่น้อยกว่า 70 Shore D
2. การทดสอบ
  - 1.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป พื้นผิวของชิ้นงาน สีของชิ้นงานให้ตรวจพินิจ
  - 1.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกและความแข็ง ให้ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 และมาตรฐาน ASTM D2240

### มาตรฐานคอมโพลีไฟเบอร์สำหรับไบบัตโตรน

1. คุณลักษณะที่ต้องการ
  - 1.1 ลักษณะทั่วไป
 

พื้นผิวของชิ้นงานต้องมีผิวเรียบ มีความมันวาว ต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าว
  - 1.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength)
 

ความต้านทานต่อแรงกระแทกไม่น้อยกว่า 50 kJ/m<sup>2</sup>
  - 1.3 ความแข็ง (Hardness)
 

ความแข็งไม่น้อยกว่า 80 Shore D
2. การทดสอบ
  - 1.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป พื้นผิวของชิ้นงาน สีของชิ้นงานให้ตรวจพินิจ
  - 1.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกและความแข็ง ให้ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 และมาตรฐาน ASTM D2240

## Impact strength essential for UAV applications of epoxy resin blend improved with modified epoxidized natural rubber

*Aunnuda Lanna<sup>1</sup>, Nattapon Pithaksareetham<sup>1</sup> and Sunisa Suchat<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup>Department of rubber Technology, Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani 84000, Thailand

\*E-mail: sunisa.su@psu.ac.th, [sun.isa.su@hotmail.com](mailto:sun.isa.su@hotmail.com)

**Abstract:** The unmanned aerial vehicles (UAV) are popular in a variety of uses. The UAV blades are increasingly made from epoxy resin (EP) composites by using polyamine hardeners as curing agents giving very high crosslink density, which also leads to some undesirable properties such as brittleness and low resistance to crack initiation and propagation. Improving the impact strength and toughness of epoxy resin was pursued by adding a rubber phase. Chemically modified epoxidized natural rubber (ENR 25 and ENR 50) has better compatibility with epoxy resin than plain natural rubber because of the polarity of oxirane rings (-O-). The ENR loading was tested from 0 to 10 parts per hundred (phr) relative to the epoxy resin (100 phr). The polymer blends were assessed for mechanical properties and morphology. It was found that 3 phr ENR in the epoxy resin blend gave the highest impact strength and tensile strength among the composites. These composites could be used in UAV propeller blades because of their physical properties that suit UAV blade applications.

**Keywords:** UAV propeller blades, epoxidized natural rubber, impact strength, composites

### 1. Introduction

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), commonly known as drones, are very popular due to their ability to access areas quickly and accurately. The UAV originated mainly in military applications, but its uses have rapidly expanded to commercial, scientific, agricultural, and other fields. When the UAV is in flight, debris can impact the fast-moving propeller blades and disable the UAV, which is clearly undesirable. The propellers are mostly made of carbon fiber, nylon, fiber glass and stainless titanium because these are strong but light-weight. However, epoxy resins are the most important part of these composites, used as the adhesive matrix with the fibers for improved strength and smooth glossy surfaces. Therefore, improving the ductility of these blades for better impact resistance is desired. The materials conventionally used in the composite are carbon fiber, epoxy resins and hardener [1-2]. Epoxy resins are nowadays used extensively because of their excellent properties, such as high modulus, low creep, and reasonable elevated temperature performance, but they easily fail under impact because of the highly crosslinked structure [3-5]. Materials that have been added to epoxy solids to improve toughness include hard particulate materials, such as inorganic glass particles [6-7]. In addition, elastomers and thermoplastics were studied, and the effects of epoxidized natural rubber (ENR) on mechanical and thermal properties varied by rubber content in the blend [8]. It was suggested that the impact strength of epoxy resin can be improved by blending in ENR [9]. ENR particles and other soft materials such as polysiloxane, have been well studied for improving the fracture toughness of brittle epoxy resin [10]. The aim of this research was to improve the critical mechanical properties of epoxy resin composites by mixing in ENR for use in unmanned aircraft blades. Two levels of epoxidation were tested, namely

ENR 25(25 mole %) and ENR 50. Composites of epoxy resin with added ENR were particularly assessed for the impact strength essential to UAV propeller applications.

## 2. Experimental

Epoxidized natural rubber was obtained from Muang Mai Guthrie Co. Ltd., in Thailand, with two alternative epoxidation degrees: ENR 25 and ENR 50.

The Bisphenol-type epoxy resin (Epichlorohydrin-bisphenol A: Epotec YD 535 LV, number average molecular weight < 700) was purchased from Aditya Birla Chemical Industry Co., Ltd., in Thailand. The polyamide resin (TH 7255) used as curing agent was supplied by Siam Chemical Industry Co., Ltd. in Thailand.

The formulation had epoxy resin (100 phr), and the tested amounts of ENR in the blends were 0, 3, 5, 7, and 10 phr (parts per hundred parts of epoxy resin by weight). The curing agent was polyamide resin (TH 7253) (35 phr). The mixture was stirred at 50 rpm under room temperature (30 °C) for 10 minutes to mix the epoxy resin with ENR 50, and for another 5 minutes with polyamine hardener (TH 7253) at the same stirrer speed. Specimens were prepared by casting the mixture in rubber molds

The izod impact test was conducted with a cantilever impact tester at room temperature, according to ASTM D256. The specimen dimensions were 63.5 × 12.7 × 3.0 mm<sup>3</sup>.

The tensile properties according to ASTM D638 of the composite was measured with Lloyd LR 10K Universal testing machine with 10 kN load cell, with the test speed of 50 mm/min.

The hardness (shore D) was tested according to ASTM D2240. The specimens used were at least 6.0 mm thick.

The scanning electron microscopy (SEM) inspection was focused to the vicinity of a razor notch, which reflects the uniform failure mode. SEM samples were coated with thin gold/palladium layer and examined in a SEM (Cambridge Stereoscan 200).

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Characteristic conform by FTIR analysis

The amount of epoxide groups in NR after in situ epoxidation was investigated by Fourier transform infrared spectroscopy. Figure 1 show peaks at the wavenumber 873 cm<sup>-1</sup> (C-O-C, asymmetric stretching). The characteristic peak at 873 cm<sup>-1</sup> stands for the asymmetric stretching vibration of oxirane ring [11], verifying the 25 and 50 mol % contents. The epoxidized product is here labeled ENR 25 and ENR 50 according to its content of epoxide groups, and was blended with epoxy resin at various ratios. The blends were successfully cured in rubber casting molds.

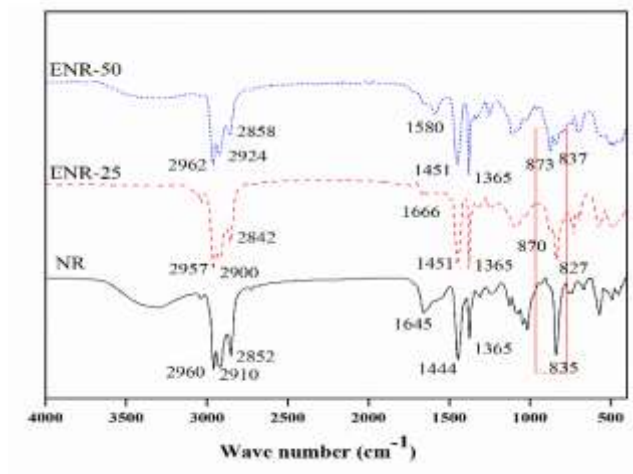


Figure 1. FTIR spectra of ENR 25 and ENR 50

### 3.2 Mechanical properties

Figure 2 shows the mechanical properties of epoxy resin blends. Addition of ENR in epoxy resin improved impact strength of epoxy resin markedly in Figure 2 (a). The globular rubber nodules contributed to this toughening effect. However, the ENR 50 offered higher impact strength than the ENR 25. The amount of ENR at 3 phr in epoxy resin gave the highest impact strengths. Regarding tensile strength, shown in Figure 2 (b), the addition of ENR in epoxy resin improved tensile strength of epoxy resin markedly in the case with 3 phr ENR. This is due to the small particle size of ENR that had good compatibility and dispersion in the epoxy matrix. Tensile strength thereafter decreased steadily with the amount of rubber, without significant difference between ENR 25 and ENR 50. Hardness of the epoxy resin blends is shown in Figure 2 (c). The results show that using ENR 50 gave higher hardness than ENR 25. This can be explained by the higher elasticity of ENR 25. Moreover, the compatibility of ENR 50 with epoxy resin is better than that of ENR 25, based on the hardness comparison.

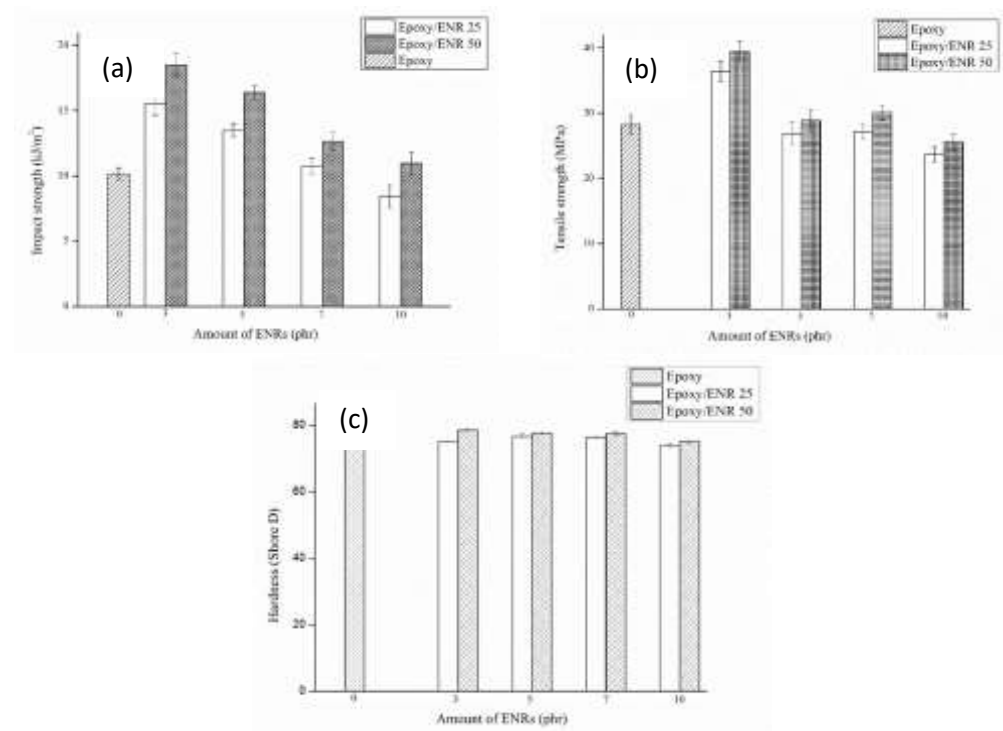


Figure 2 The mechanical properties of epoxy resin

### 3.3 Morphology

SEM micrographs (Figure 3) show ENR 25 and ENR 50 large sized particles. The globular rubber nodules improved impact and tensile strengths. The EP/ENR composite had better interactions at phase boundaries in the case of ENR 50, which gave higher impact strength than ENR 25. The 3 phr ENR 50 is an appropriate choice to improve impact strength.

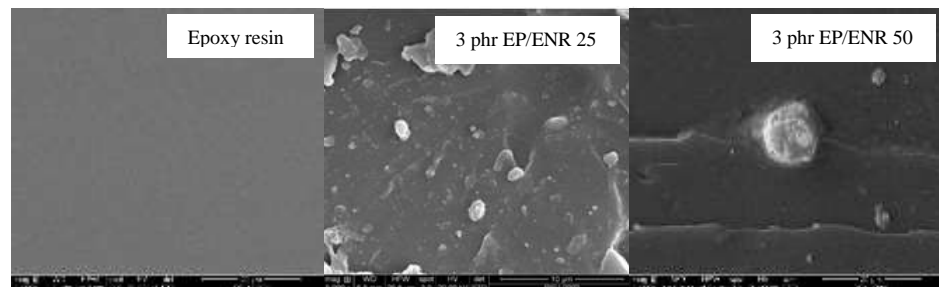


Figure 3. SEM micrographs of fracture surfaces of epoxy without and with 3 phr ENR (ENR 25 or ENR 50)

#### 4. Conclusion

The results show that epoxidized natural rubber improved the impact strength of epoxy resin. The impact strength was highest when the amount of rubber did not exceed 5 phr. Further, ENR 50 offered better impact strength than ENR 25. Tensile strength of the blends decreased steadily as the amount of rubber was further increased. Natural rubber epoxidized to 50 mole percent level at 3 phr loading is a good choice to improve the impact resistance of epoxy resin for use in Unmanned Aerial Vehicles, specifically in their propeller blades.

#### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the Research and Researcher for Industry Program, the National Research Council of Thailand, and Muang Mai Guthrie Co. Ltd., in Thailand, for financial support and for providing the samples and the experiment station. Assoc. Prof. Seppo Karrila provided assistance with manuscript preparation.

#### References

- [1] V. Jaiganesh, and S. Manivannan, Numerical Analysis and Simulation of Nylon Composite Propeller for Aircraft, *Procedia Engineering*, (2014) 1079-1088.
- [2] B.M. Madhusudhan and P.V. Srihari, Design and Analysis of Composite Propeller Blade for Aircraft, *Engineering research and applications*, (2014) 2248-9622.
- [3] S. Chuayjuljit, N. Soatthiyanon, P. Potiyaraj, Polymer Blends of Epoxy Resin and Epoxidized Natural Rubber. *Applied polymer science*, (2006) 452–459.
- [4] E. Butta, G. Levita, A. Marchetti and A. Lazzeri, Morphology and of amine-terminated butadiene-acrylonitrile/epoxy blends. *Polym Eng Sci*, (1986) 6373.
- [5] B.U. Kang, J.Y. Jho, J. Kim, S.S. Lee, M. Park, Lim, S. and C.R.J. Choe, High performance HTLNR/epoxy blend-phase morphology and thermo-mechanical properties, *Applied polymer*, (2001) 38- 79.
- [6] L. Guadagno, L. Vertuccio, A. Sorrentino, M. Raimondo, C. Naddeo, V. Vittoria, G. Iannuzzo, E. Calvi and S. Russo, Mechanical and barrier properties of epoxy resin filled with multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, (2009) 2419-2430.
- [7] F. L. Jin and S.J. Park, Interfacial toughness properties of trifunctional epoxy resins/ calcium carbonate nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, (2008) 190-193.
- [8] P. Kelly, *Epoxy vinyl ester and other resins in chemical process equipment. Reinforced Plastics, Durability*, Cambridge, UK, Woodhead, (1999) 282-293.
- [9] S. G. Hong and C. K. Chan, The curing behaviors of the epoxy/dicyanamide system modified with epoxidized natural rubber, *Thermochimica Acta*, (2004) 99-106.



[10] P. Bussi and H. Ishida, Dynamic mechanical properties of epoxy resin / epoxidized rubber blend effect of phase separated rubber, Polym. Sci., Part B, (1994) 647-657.

[11] S.-N. Gan, Z.A. Harmid, Partial conversion of epoxide group to diols in epoxidized natural rubber, Polymer 38, (1997) 1953-1956.

## Impact Strength Essential for UAV Applications of Epoxy Resin Blend Improved with Epoxidized Natural Rubber

Aunnuda Lanna and Sunisa Suchat\*

Department of Rubber Technology, Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani 84000, Thailand

\*E-mail: sunisa.su@psu.ac.th, sun.isa.su@hotmail.com

### Abstract

The unmanned aerial vehicles (UAV) are popular in a variety of usages. The UAV blades are increasingly made from epoxy resin (EP) composites by using polyamine hardeners as curing agents giving very high crosslink density, which also leads to some undesirable properties such as brittleness and low resistance to crack initiation and propagation. Improving the impact strength and toughness of epoxy resin was pursued by adding a rubber phase. Chemically modified epoxidized natural rubbers (ENR 25 and ENR 50) have better compatibility with epoxy resin than plain natural rubber because of the polarity of oxirane rings (-O-). The ENR loading was tested from 0 to 10 part by weight (pbw) relative to the epoxy resin (100 pbw). The polymer blends were assessed for mechanical properties and morphology. It was found that 5 phr of ENR in the epoxy resin blend gave the highest impact strength and tensile strength among the composites. These composites could be used in UAV propeller blades because of their physical properties that suit UAV blade applications.

**Keywords:** UAV propeller blades, epoxidized natural rubber, impact strength, composites

### 1. Introduction

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), commonly known as drones, are very popular due to their ability to access areas quickly and accurately. The UAV originated mainly in military applications, but its uses have rapidly expanded to commercial, scientific, agricultural, and other fields. When the UAV is in flight, debris can impact the fast-moving propeller blades and disable the UAV, which is clearly undesirable. The propellers are mostly made of carbon fiber, nylon, fiber glass and stainless titanium because these are strong but light-weight. However, epoxy resins are the most important part of these composites, used as the adhesive matrix with the fibers for improved strength and smooth glossy surfaces. Therefore, improving the ductility of these blades for better impact resistance is desired. The materials conventionally

used in the composite are carbon fiber, epoxy resins and hardener [1-2]. Epoxy resins are nowadays used extensively because of their excellent properties, such as high modulus, low creep, and reasonable elevated temperature performance, but they easily fail under impact because of the highly crosslinked structure [3-5]. Materials that have been added to epoxy solids to improve toughness include hard particulate materials, such as inorganic glass particles [6-7]. In addition, elastomers and thermoplastics were studied, and the effects of epoxidized natural rubber (ENR) on mechanical and thermal properties varied by rubber content in the blend [8]. It was suggested that the impact strength of epoxy resin can be improved by blending in ENR [9]. ENR particles and other soft materials such as polysiloxane, have been well studied for improving the fracture toughness of brittle epoxy resin [10]. The aim of this research was to improve the critical mechanical

properties of epoxy resin composites by mixing in ENR for use in unmanned aircraft blades. Two levels of epoxidation were tested, namely ENR 25 (25 mole %) and ENR 50 (50 mole %). Composites of epoxy resin with added ENR were particularly assessed for the impact strength essential to UAV propeller applications.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials

2.2.1 Epoxidized natural rubber (ENR) was obtained from Muang Mai Guthrie Co. Ltd., Thailand, with two different epoxidation degrees: ENR 25 and ENR 50.

2.2.2 The Bisphenol-type epoxy resin (YD 535 LV) (Epichlorohydrin-bisphenol A: Epotec, number average molecular weight < 700) was purchased from Aditya Birla Chemical Industry Co., Ltd., Thailand.

2.2.3 The polyamide resin (TH 7255) used as curing agent was supplied by Siam Chemical Industry Co., Ltd. Thailand.

### 2.2 Preparation of composite

The formulation had epoxy resin (100 pbw), and the tested amounts of ENR in the blends were 0, 3, 5, 7, and 10 pbw. The curing agent was polyamide resin (TH 7253) (35 pbw). The mixture was stirred at 50 rpm under room temperature for 10 minutes to mix the epoxy resin with ENR 50, and for another 5 minutes with polyamine hardener (TH 7253) at the same stirrer speed. Specimens were prepared by casting the mixture in rubber molds.

### 2.3 Characterization of material

#### 2.3.1 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

Approximately 15 mg sample of the composite was used for Fourier transform infrared spectroscopy analysis. The recorded spectra were averages of 32 scans over the wave number range 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  at 4  $\text{cm}^{-1}$  resolution.

#### 2.3.2 Nuclear magnetic resonance

Approximately 50 mg of the ENR sample was dissolved in  $\text{CDCl}_3$  and analyzed for one-dimensional of proton nuclear magnetic

resonance ( $^1\text{H-NMR}$ ) at 400 MHz using a Bruker DPX 300 Fourier transform NMR spectrometer operating by Bruker, Rheinstetten, Germany. The protons of the double bonds in the natural rubber structure ( $I_{\text{NR}}$ ) were assessed. The epoxide content was obtained from the change in double bonds in the rubber with epoxide ( $I_{\text{ENR}}$ ) according to equation 1, using the  $^1\text{H-NMR}$  characteristics [11].

$$\text{Mol\% epoxidation} = [I_{\text{ENR}}/(I_{\text{ENR}}+I_{\text{NR}})] \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

#### 2.3.3 Dynamic light scattering

Dynamic light scattering (DLS) is a technique to measure the intensity of light intensity, also known as photo correlation spectroscopy (PCS), which is a technique used to measure the particle size in nanometers ranging from 0.005 - 5  $\mu\text{m}$ . DLS were measured at room temperature in suspension mode using Annalys 22 Nanotech.

### 2.4 Mechanical properties of composite

#### 2.4.1 Impact strength

The izod impact test was conducted with a cantilever impact tester at room temperature, according to ASTM D256. The specimen dimensions were 63.5 x 12.7 x 3.0  $\text{mm}^3$ .

#### 2.4.2 Tensile strength

The tensile properties according to ASTM D638 of the composite was measured with Lloyd LR 10K Universal testing machine with 10 kN load cell, with the test speed of 50 mm/min.

#### 2.4.3 Hardness

The hardness (shore D) was tested according to ASTM D2240. The specimens used were at least 6.0 mm thick.

### 2.5 Morphology

The scanning electron microscopy (SEM) inspection was focused to the vicinity of a razor notch, which reflects the uniform failure mode. SEM samples were coated with thin gold/palladium layer and examined in a SEM (Cambridge Stereoscan 200).

### 2.6 Statistical analyses

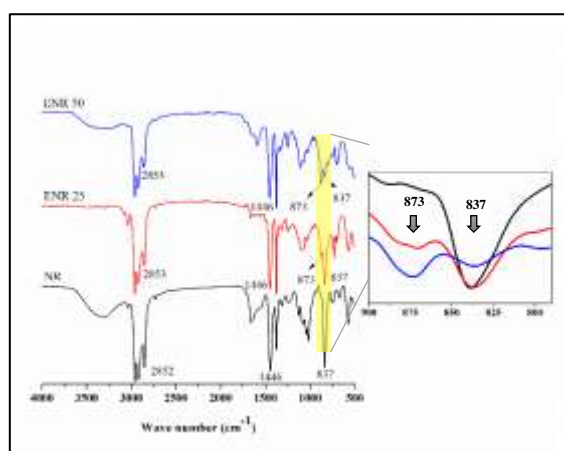
The data were subjected to analysis of variance. The Different superscripts in a column indicate statistically significant

differences at 95% confidence by Duncan's method. Mean±SD: mean and standard deviation based on triplicate samples.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Characteristic conform by FTIR analysis

The ENR was characterized for its epoxidation (in mol %) using FTIR. The characteristic peaks of NR (Figure 1a) appeared at 2858, 1660, 1446, 1375 and 838  $\text{cm}^{-1}$ , and were assigned to the C-H stretching, C=C stretching,  $\text{CH}_2$ - deformation, C-H deformation of  $\text{CH}_2$  and =C-H deformation, respectively [12]. As the C=C bonds in NR molecules were randomly converted into epoxide groups, new characteristic peaks emerged at 1251 and 873  $\text{cm}^{-1}$  in the spectrum of ENR, attributed to the symmetric and asymmetric stretching of epoxide ring, respectively (Figure 1). Therefore, as the mol % epoxidation increased, the peak at 873  $\text{cm}^{-1}$  increased

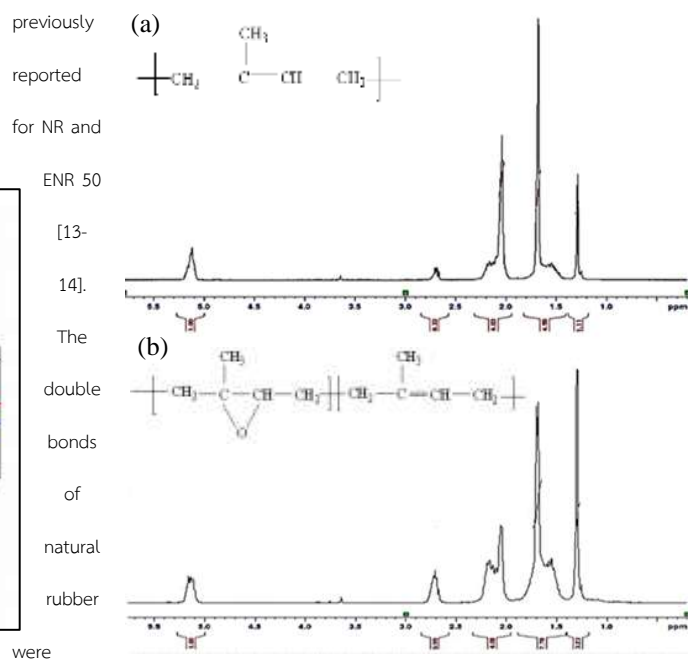


correspondingly, and the reduction in the number of C=C in ENR was reflected by decreased peaks at 1660 and 837  $\text{cm}^{-1}$ . This confirmed the formation of epoxide rings from the reaction with performic acid (generated in situ by reacting  $\text{HCOOH}$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) of the C=C bonds on the NR backbones. The epoxidized product is here labeled ENR 25 and ENR 50 according to its content of epoxide groups, and was blended with epoxy resin at various ratios. The blends were successfully cured in rubber casting molds.

Figure 1. FTIR spectra of ENR 25 and ENR 50

#### 3.2 Nuclear magnetic resonance

The  $^1\text{H-NMR}$  spectrum of NR using  $\text{CDCl}_3$  as the solvent was consistent with ENR 50 (Figures 2a and 2b).  $^1\text{H-NMR}$  of NR showed three main peaks at 5.26, 2.06 and 1.68 ppm, which are characteristic of olefinic protons ( $\text{HC-}$ ), methylene protons ( $-\text{CH}_2-$ ) and methyl protons ( $-\text{CH}_3$ ), respectively (Figure 2a).  $^1\text{H-NMR}$  of ENR clearly showed four significant peaks at chemical shifts that are consistent with cis-1, 4-polyisoprene. These peaks at 5.14, 2.70, 2.05, 1.70 and 1.30 ppm are characteristic of olefinic protons, methine proton, methylene protons of the ENR 50, methyl protons and methyl protons of the purified ENR 50, respectively (Figure 2b). These NMR results are in agreement with those



previously reported for NR and ENR 50 [13-14]. The double bonds of natural rubber were partly replaced by epoxide. The chemical shift at about 2.70 ppm is caused by proton removal from the epoxide group [15], while the shift at 5.14 ppm reflects bonding of the protons in the double bond, in the original structure of natural rubber indicating that the epoxide mass had been increased. Therefore, the amount of epoxide was estimated from the change in the double bonds of rubber ( $I_{5.14}$ ) converted to epoxide ( $I_{2.70}$ ) (Figure 2).

$$\text{Mol\% epoxidation} = [I_{2.70}/(I_{2.70}+I_{5.14})] \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Equation 1 gave an epoxide content estimate of 25 and 50 mol % in the prepared ENR, in good agreement with the estimate from FTIR.

Figure 2. The  $^1\text{H-NMR}$  spectra of (a) ENR 25 and (b) ENR 50

### 3.3 Particle size of raw material

The particle size distributions of ENRs are shown in Figure 3. Dynamic light scattering provides quick, precise and repeatable nanoparticle size data and it is an essential tool for the nanoparticle technologist. The z-average diameters obtained with the SZ-100 are listed. The size distribution of ENR 25 is a unimodal, it has one peak in Figure 2a. There are many smaller about 0.8  $\mu\text{m}$  (10%), and then larger about 1.2  $\mu\text{m}$  (90%) it is a blend of two kinds of particle. And Figure 3b show size distribution of ENR 50 is a unimodal. And the ENR 50 with nominal particle size around 1.6  $\mu\text{m}$ .

### 3.4 Mechanical properties

The mechanical properties at various type and amount of ENR in the epoxy resin were determined: impact strength, hardness, tensile strength, and hardness. These are shown in Table 1 and in Figure 3. Figure 3 shows the impact strength of epoxy resin blends. Addition of ENR in epoxy resin improved impact strength of epoxy resin markedly. The globular rubber nodules contributed to this toughening effect. However, the ENR 50 offered higher impact strength than the ENR 25. The amount of ENR at 5 pbw in epoxy resin gave the highest impact strengths. Table 1 shows the mechanical properties of epoxy resin blends. Regarding tensile strength, the addition of ENR in epoxy resin reduced tensile strength of epoxy resin markedly, ENR 50 shows the tensile strength more than ENR 25 in all of case with ENR 50. This is due to the small particle size of ENR that had good compatibility and dispersion in the epoxy matrix. Tensile strength thereafter decreased steadily with the amount of rubber, without significant difference between ENR 25 and ENR 50.

The results show that using ENR improved tear strength of composite, and 5 pbw of ENR 50 gave higher tear strength than ENR 25. This can be explained by the higher elasticity of ENR 25. Moreover, the compatibility of ENR 50 with epoxy resin is better than that of ENR .

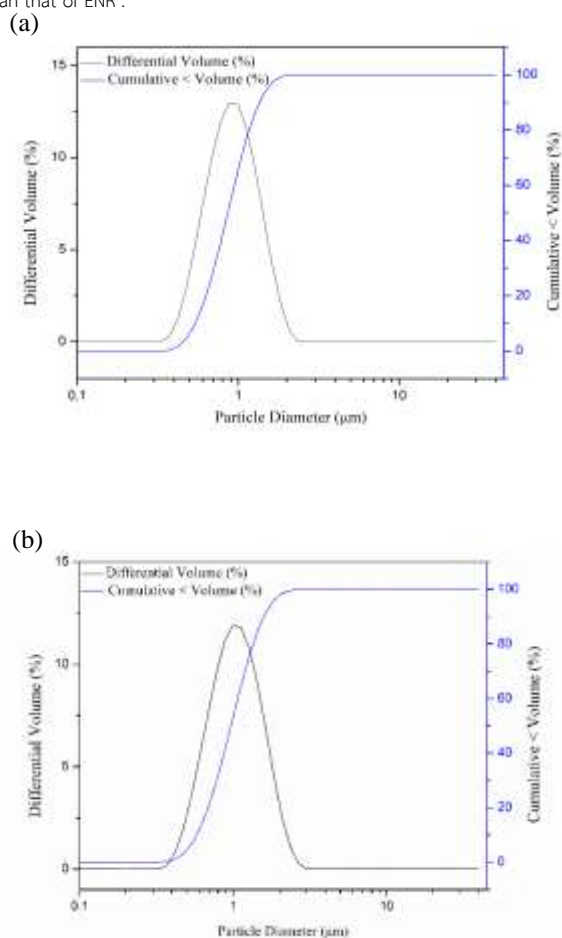


Figure 3. Particle size of (a) ENR 25 and (b) ENR 50

Table 1. The mechanical properties of composite

ENR (phr)	Tensile Strength (MPa)		Impact Strength (kJ/m <sup>2</sup> )	
	ENR 25	ENR 50	ENR 25	ENR 50
0	50.29± 3.34	50.29± 3.34	10.15± 0.48	10.15± 0.48
3	46.22± 0.12	47.05± 2.47	14.06± 0.82	14.27± 0.11
5	41.96± 1.21	48.26± 5.14	14.51± 0.45	14.87± 0.11
7	32.53 ±1.49	42.42± 1.94	10.73± 0.45	12.64± 0.78
10	28.79± 2.07	21.48± 0.92	8.45± 0.64	10.56± 1.48

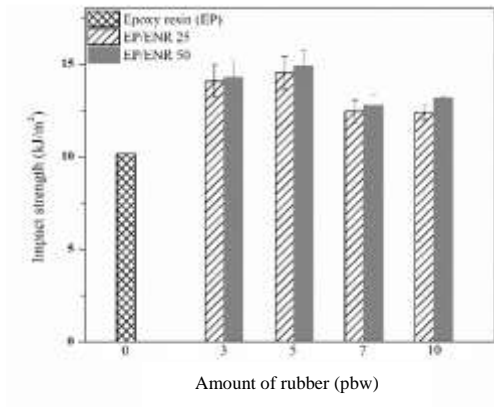


Figure 4. Impact strength of epoxy resin

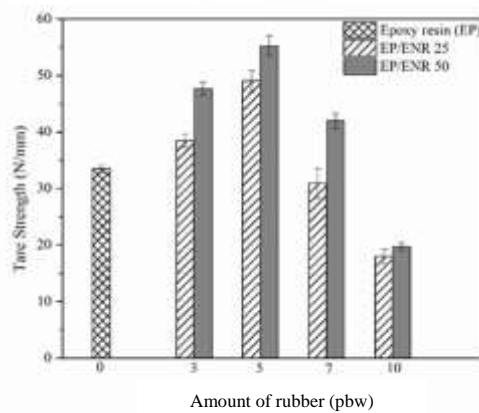


Figure 5. Tear strength of epoxy resin

### 3.5 Morphology

SEM micrographs (Figure 6) show large ENR 25 and ENR 50 particles. The globular rubber nodules improved impact and tensile strengths. The EP/ENR composite had better interactions at phase boundaries in the case of ENR 50, which gave higher impact strength than ENR 25. The 5 pbw of ENR 50 is an appropriate choice to improve impact strength.

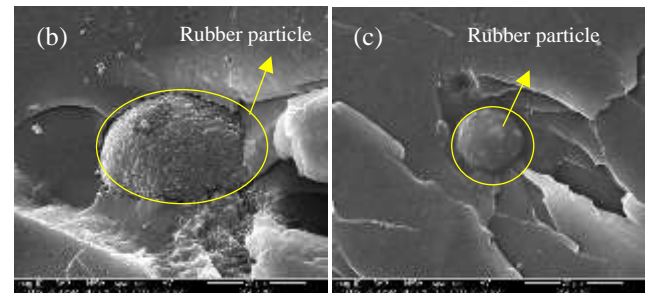
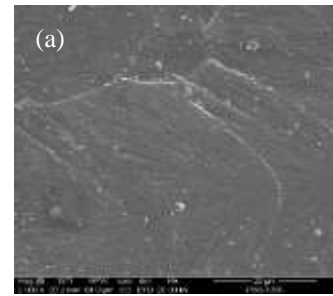


Figure 6. SEM micrographs of fracture surfaces of composite (a) epoxy resin pure, (b) epoxy resin/ENE 25 and (c) epoxy resin/ENE 25 (ENR 5 pbw)

### 4. Conclusion

The results show that epoxidized natural rubber improved the impact strength of epoxy resin. The impact strength was highest when the amount of rubber did not exceed 5 phr. Further, ENR 50 offered better impact strength than ENR 25. Tensile strength of the blends decreased steadily as the amount of rubber was further increased. The epoxidized natural rubber to 50 mole percent level at 5 pbw loading is a good choice to improve the impact resistance of epoxy resin for use in Unmanned Aerial Vehicles, specifically in their propeller blades.

### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the Research and Researcher for Industry Program, and Muang Mai Guthrie Co. Ltd., in Thailand, for financial support and for providing the samples

and the experiment station. Assoc. Prof. Seppo Karrila provided assistance with manuscript.

15. Thitithammawong A.; Srangkhum S.; Rungvichaniwat A. *Journal of Rubber Research* 2011, 14(4): 230-240.

## References

1. Jaiganesh, V.; Manivannan, S. *Procedia Engineering* 2014, 97, 1079-1088.
2. Jakobsen J.; Jensen M.; Andreassen JH. *Polymer Testing* 2013, 32(8): 1350-1357
3. Chuayjuljit, S.; Soatthiyanon, N.; Potiyaraj, P. *Journal of Applied Polymer Science* 2006, 102 (1), 452-459.
4. Butta, E.; Levita, G.; Marchetti, A.; Lazzeri, A. *Polymer Engineering and Science* 1986, 26 (1), 63-73.
5. Mathew, V. S.; Jyotishkumar, P.; George, S. C.; Gopalakrishnan, P.; Delbreith, L.; Saiter, J. M.; Saikia, P. J.; Thomas, S. *Journal of Applied Polymer Science* 2012, 125 (1), 804-811.
6. Guadagno, L.; Vertuccio, L.; Sorrentino, A.; Raimondo, M.; Naddeo, C.; Vittoria, V.; Iannuzzo, G.; Calvi, E.; Russo, S. *Carbon* 2009, 47 (10), 2419-2430.
7. Jin, F.-L.; Park, S.-J. *Materials Science and Engineering: A* 2008, 475 (1-2), 190-193.
8. Kelly, P. *Reinforced Plastics Durability*, Woodhead Pub. Ltd 1999, 282-321.
9. Hong, S.-G.; Chan, C.-K. *Thermochimica Acta* 2004, 417 (1), 99-106.
10. Bussi, P.; Ishida, H. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 1994, 32 (4), 647-657.
11. Burfield DR, Lim K-L, Law K-S, Ng S. *Polymer* 1984, 25(7): 995-998.
12. Saito T.; Klinklai W.; Kawahara S. *Polymer* 2007, 48(3): 750-757.
13. Pongsathit S.; Pattamaprom C. *Radiat Phys Chem* 2017, 144: 13-20.
14. Dahham OS.; Hamzah R.; Bakar MA.; Zulkepli NN.; Dahham SS.; Ting SS. *Polymer Testing* 2017, 59: 55-66.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวอัญนุดา หลั่นหั้นะ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6040320206

### วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

### ทุนการศึกษา

โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ที่ทีมอบทุนผู้ช่วยวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท ประจำปี 2560 รหัสโครงการ MSD60I0087 ที่สนับสนุนทุนค่าธรรมการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาที่เน้นการศึกษาวิจัย

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

A. Lanna, N. Pithaksareetham and S. Suchat, “Effect of loading of epoxidized natural rubber on impact strength of UAV applications” Proceedings of the Third Asia Pacific Rubber Conference (APRC), November 16-17; Surat Thani, Thailand.

Aunnuda Lanna and Sunisa Suchat, “Impact Strength Essential for UAV Applications of Epoxy Resin Blend Improved with Epoxidized Natural Rubber” Proceedings of the International Polymer Conference of Thailand (PCT-9), June 13<sup>th</sup> – 14<sup>th</sup>, 2019; Amari Watergate Bangkok Hotel, Bangkok Thailand.



