

อิทธิพลของอีพ็อกซีเรซินที่ผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์/
ซิลิกาโนคอมโพสิตต่อสมบัติของใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

**Influence of Blending Epoxy Resin with ENR and ENR/Silica Nanocomposite on
Properties of UAV Propeller Application**

ณัฐพล พิทักษ์เสรีธรรม

Nattapon Pithaksareetham

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียาง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Science Program in Rubber Technology

Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ อธิปไตยของอิพ็อกซีเรซินที่ผสมยางธรรมชาติอิพ็อกไซด์และยางธรรมชาติ
อิพ็อกไซด์/ซิลิกานาโนคอมโพสิตต่อสมบัติของใบพัดอากาศยานไร้คนขับ
ผู้เขียน นายณัฐพล พิทักษ์เสรีธรรม
สาขาวิชา เทคโนโลยียาง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา สุชาติ)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สกุลรัตน์ พิชัยยุทธ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง)

.....
(ดร.เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์)

.....กรรมการ
(ดร.เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา สุชาติ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับ
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยียาง

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนิสา สุชาติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายณัฐพล พิทักษ์เสรีธรรม)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายณัฐพล พิทักษ์เสวีธรรม)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอีพ็อกซีเรซินที่ผสมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์/ซิลิกานาโนคอมโพสิตต่อสมบัติของไบพัดอากาศยานไร้คนขับ
ผู้เขียน	นายณัฐพล พิทักษ์เสรีธรรม
สาขาวิชา	เทคโนโลยียาง
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxydized Natural Rubber, ENR) ได้โดยเตรียมผ่านปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันเพื่อให้มีปริมาณของหมู่อีพ็อกไซด์ 50 เปอร์เซนต์โมล (ENR 50) โดยสัดส่วนของยาง ENR 50 ที่ผสมในอีพ็อกซีเรซินคือ 0, 3, 5, 7 และ 10 ส่วนของอีพ็อกซีเรซิน 100 ส่วน (part per hundred of epoxy resin, phe) นอกจากนี้ยังมีการแปรปริมาณนาโนซิลิกาที่เติมลงในคอมโพสิตของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่แปรอัตราส่วน 1, 2, 3, 4 และ 5 phe ปริมาณยาง ENR 50 มีผลต่อสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาดและความต้านทานการกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมยาง ENR 50 ที่อัตราส่วน 3 phe ขณะเดียวกันสมบัติด้านความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อมีการเติมนาโนซิลิกาส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูง พบว่าอัตราส่วน 3 phe ของนาโนซิลิกาให้ความต้านทานการกระแทกสูงที่สุดถึง 45 % เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินอ้างอิง แต่ความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และทำการขึ้นรูปนาโนคอมโพสิตในอัตราส่วนที่ดีที่สุดร่วมกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยเทคนิค Infusion เพื่อผลิตไบพัดอากาศยานไร้คนขับและทดสอบสมบัติเชิงกล ผลทดลองพบว่าสูตรที่ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินสามารถขึ้นรูปได้และส่งผลให้สมบัติของไบพัดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ใช้อีพ็อกซีเรซินอ้างอิง โดยเฉพาะสมบัติที่สำคัญคือค่าความต้านทานต่อการกระแทกเพิ่มสูงขึ้น 31%

คำสำคัญ: นาโนคอมโพสิต นาโนซิลิกา ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ และไบพัดอากาศยานไร้คนขับ

Thesis Title Influence of blending of Epoxy Resin with ENR and ENR/Silica Nanocomposite on Properties of UAV Propeller Application

Author Mr. Nattapon Pithaksareetham

Major Program Rubber Technology

Academic Year 2018

ABSTRACT

The epoxidized natural rubber (ENR) was prepared via *in situ* epoxidation reaction to contain 50 mol% epoxide groups (ENR 50). The fraction of ENR 50 in the blends was 0, 3, 5, 7, and 10 parts per hundred of epoxy resin (phe) relative to the epoxy resin. Also, the silica nanoparticle contents of epoxy composite was tested for 0, 1, 2, 3, 4, and 5 phe. The results show that, the mechanical properties such as tensile strength, tear strength and impact strength of nanocomposite increased when ENR 50 was added at 3 phe, while hardness properties tend to be increased when nanosilica content was loaded. Hardness and tensile strength, especially at 3 phe of nanosilica exhibited highest in impact strength about 45 % higher than the original one. The mechanical properties correlated well with morphological properties analyzed by scanning electron microscope (SEM). Thus, we selected the appropriated ratio composition of nanocomposite (3 phe ENR 50 blending with 3 phe nanosilica) to infusion molding, in the process of making the blade. The result shown that, the best nanocomposite formula use in the blade building process, and give the higher properties than the epoxy original one, by increase impact strength in 31%

Keywords: Nanocomposite, Nanosilica, Epoxidized natural rubber, UAV propeller blade

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา สุขชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและคณะกรรมการคุมสอบทุกท่านได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทองและดร.สกุลรัตน์ พิชัยบุทธิ์ สำหรับคำแนะนำ การชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน และแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาในงานวิจัยเสมอมา ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอนข้าพเจ้ามาจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการปฏิบัติงานและคุณสมบัติพิเศษ เพชรทอง ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย

ขอขอบคุณกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ประจำปี 2559 ที่สนับสนุนค่าธรรมการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่เน้นการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปี 2560 ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

ขอบคุณพี่ๆ ปรียญาเอกและเพื่อนๆ น้องๆ ปรียญาโททุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาแบ่งปันความสนุกสนานและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่คอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าอย่างดีที่สุดและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ประโยชน์ที่เกิดจากงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากบุคลากรที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถทำงานวิจัยไปได้อย่างราบรื่นและลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ณัฐพล พิทักษ์เสรีธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.2.1 คอมโพสิตไบพีด	2
1.2.2 การปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน	3
1.2.3 การปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินโดยใช้นาโนซิลิกา	4
1.2.4 ศึกษาสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน	5
1.3 วัตถุประสงค์	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 อากาศยานไร้คนขับ	8
2.2 นาโนคอมโพสิต	9
2.3 คาร์บอนไฟเบอร์	9
2.4 อีพ็อกซีเรซิน	10
2.5 คอมโพสิต	12
2.6 นาโนเทคโนโลยี	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ยางธรรมชาติ สมบัติและส่วนประกอบ	13
2.7.1 องค์ประกอบของน้ำยาง	14
2.7.2 สมบัติของยางธรรมชาติ	14
2.8 ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์	15
2.9 ซิลิกา	16
2.10 สารเชื่อมโยง	16
2.11 เทคนิคขึ้นรูปคอมโพสิต	17
2.11.1 Hand-layup	17
2.11.2 Spray-up	18
2.11.3 Filament Winding	18
2.11.4 Resin Transfer Molding	19
2.11.5 Infusion	20
2.12 เทคนิคการวิเคราะห์คอมโพสิต	20
2.12.1 Fourier-Transform Infrared Spectroscopy	20
2.12.2 Proton Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy	21
2.12.3 Scanning Electron Microscope	22
2.12.4 Thermogravimetric Analysis	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.1 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์	24
3.2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2.1 วิเคราะห์หาปริมาณหมู่เอพอกไซด์ของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค FTIR และ $^1\text{H-NMR}$	25
3.2.2 เตรียมแบบพิมพ์จากยางธรรมชาติ	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 อิทธิพลของคอมโพสิตที่ฟ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	27
3.2.4 อิทธิพลของคอมโพสิตที่ฟ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา	28
3.2.5 ทดสอบสมบัติเชิงกล	29
3.2.6 ลักษณะของแบบพิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปไบพัดอากาศยานไร้คนขับ	31
3.2.7 การขึ้นรูปไบพัดอากาศยานไร้คนขับด้วยเทคนิค Infusion	32
3.2.8 ทดสอบสมบัติของคอมโพสิตที่ขึ้นรูปไบพัด UAV	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	35
Part I: วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติฟอกไซค์	35
4.1 วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติฟอกไซค์โดยเทคนิค FTIR	35
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค ¹ H-NMR	36
Part II: การปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินด้วยยาง ENR 50	37
4.1 ลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป	37
4.2 โครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ผสมและสารคงรูป	38
4.3 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	40
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	44
4.5 สมบัติทางความร้อนของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	46
Part III: การปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินด้วยยาง ENR 50 ผสมนาโนซิลิกา	49
4.1 โครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ผสมนาโนซิลิกา และสารคงรูป	49
4.2 ลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ผสมนาโนซิลิกา และสารคงรูป	51
4.3 ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิต	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต	52
4.5 สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิต	57
4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิต	58
Part IV ศึกษาการขึ้นรูปไบพ้อคอากาศยานไร้คนขับ	60
4.1 ขึ้นรูปไบพ้อคอากาศยานไร้คนขับและแปรปริมาณชั้นคาร์บอนไฟเบอร์	60
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปไบพ้อคด้วยแบบพิมพ์โลหะ	61
4.3 ขึ้นรูปไบพ้อคอากาศยานไร้คนขับ โคนแปรปริมาณของนาโนซิลิกา	63
4.4 สมบัติเชิงกลของคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบนาโนคอมโพสิต	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5 สรุปผลการทดลอง	68
6 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	73
ประวัติผู้เขียน	116
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	116

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบน้ำยารักษา	14
3.1 สูตรน้ำยารักษา	26
3.2 อัตราส่วนผสมของอิพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50	27
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานาโนคอมโพสิต	28
4.1 การเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของ NR และ ENR 50	36
4.2 ลักษณะทางกายภาพของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูปต่อระยะเวลา การผสม	37
4.3 พื้นที่ใต้กราฟ FTIR ของวงออกซิเริน หมู่ไฮดรอกซิลและอัตราส่วนความเข้มข้น	38
4.4 สมบัติเชิงกลของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	44
4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของอิพ็อกซีเรซินและอิพ็อกซีเรซิน ผสมยาง ENR 50	48
4.6 จุดกึ่งกลางแถบการสั่นของหมู่ออกซิเรินกับไฮดรอกซิลเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใต้กราฟ	50
4.7 ลักษณะทางกายภาพของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ผสมนาโนซิลิกาและสารคงรูปต่อ ระยะเวลาการผสม	51
4.8 ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตที่แปรปริมาณนาโนซิลิกา	52
4.9 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต	56
4.10 ปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหาขณะขึ้นรูปไบพด	61

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของ UAV	8
2.2 โครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินชนิดไดโกลซิคลีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ	11
2.3 โครงสร้างของบิสฟีนอล เอฟ เบสอีพ็อกซีเรซิน	11
2.4 โครงสร้างของไฮแดนโทอินเรซิน	11
2.5 โครงสร้างของโนโวเล็ก	12
2.6 โครงสร้างของเปอร์แอซิดเรซิน	12
2.7 โครงสร้างยางธรรมชาติ	13
2.8 (ก)โครงสร้างยางธรรมชาติ และ(ข)โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไดซ์	15
2.9 การขึ้นรูปแบบ Hand-layup	17
2.10 การขึ้นรูปแบบ Spray-up	18
2.11 การขึ้นรูปแบบ Filament winding	19
2.12 การขึ้นรูปแบบ Resin Transfer Molding	19
2.13 การขึ้นรูปแบบ Infusion	20
2.14 เครื่องวิเคราะห์ FTIR	21
2.15 เครื่องวิเคราะห์ ¹ H-NMR	22
2.16 เครื่องวิเคราะห์ SEM	23
2.17 เครื่องวิเคราะห์ TGA	23
3.1 แบบพิมพ์ทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้จากยางธรรมชาติ	26
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการผสมอีพ็อกซีเรซินกับยาง ENR 50	27
3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการผสมนาโนคอมโพสิต	28
3.4 การหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยโปรแกรม FTIR	30
3.5 แบบพิมพ์เหล็กผลิตใบพัด UAV	31

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
3.6 แผนผังการขึ้นรูปไบพัด	32
3.7 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต UAV	34
4.1 สเปกตรัม FTIR ของยาง ENR 50 และยางธรรมชาติ	35
4.2 สัญญาณ ¹ H-NMR ของยาง ENR 50	37
4.3 สเปกตรัมคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน (a) อีพ็อกซีเรซิน, (b) อีพ็อกซีเรซิน/สารคงรูปและ (c) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป	39
4.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	40
4.5 ความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	41
4.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	42
4.7 ความแข็งของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	43
4.8 ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50	45
4.9 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคของยาง ENR 50 ที่ใส่ในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน โดยมีการแปรปรมาณ (a) 3 phe, ENR 50 และ (b) ผสม 7 phe, ENR 50	46
4.10 กราฟ TGA (a) และ DTA (b) ของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่ปริมาณต่างกัน	47
4.11 เส้นสเปกตรัม FTIR ของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 นาโนซิลิกาและสารคงรูป เปรียบเทียบกับอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป	49
4.12 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน	52
4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน	53
4.14 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน	54
4.15 ความต้านทานการฉีกขาดของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน	55

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาต่างกันเทียบกับอุณหภูมิ (b) กราฟขยายอุณหภูมิการเสื่อมสลายช่วงแรกของนาโนคอมโพสิต	57
4.17 สันฐานวิทยาของ (a) คอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50, (b) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา 3 phe, (c) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา 5 phe	58
4.18 SEM-EDX แสดงถึงธาตุของนาโนซิลิกาในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน (a) นาโนซิลิกา 3 phe (b) นาโนซิลิกา 5 phe	59
4.19 การขึ้นรูปใบพัดคอมโพสิตแบบ Infusion จากแบบเป่าพิมพ์เหล็ก	60
4.20 ใบพัดอากาศยานไร้คนขับที่มีการแปรปริมาณจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (a) 1 ชั้น (b) 2 ชั้น (c) 3 ชั้น (d) 4 ชั้นและ (e) 5 ชั้น	62
4.21 ลักษณะของใบพัด UAV เมื่อแปรปริมาณนาโนซิลิกา	63
4.22 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์	65
4.23 ความต้านแรงดัดโค้งของนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์	66
4.24 ความทนแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำเทคโนโลยีทางด้านอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) หรือ โดรนมาใช้งานในเชิงพาณิชย์เพิ่มสูงขึ้น ตามคาดการณ์ของมูลค่าทางการตลาด พบว่าปริมาณการใช้งาน โดรนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นถึง 4.54 ล้านล้านบาท เนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้อย่างรวดเร็ว และมีความสามารถทางการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การคมนาคม การเกษตร การจราจรและภารกิจทางทหาร เป็นต้น ซึ่งการควบคุมอากาศยานไร้คนขับสามารถควบคุมด้วยรีโมทคอนโทรลด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (Autopilot) อีกทั้งมีระบบติดตามการบินจากภาคพื้นดินพร้อมทั้งสามารถรับสัญญาณภาพถ่าย ในขณะที่ทำการสำรวจ ซึ่งเป็นจุดเด่นของ UAV ทำให้หน่วยงานต่างๆ เล็งเห็นถึงความสำคัญและความเป็นไปได้ที่นำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้กับงานทั่วไปให้ได้มากยิ่งขึ้น

UAV มีส่วนประกอบมากมาย แต่ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดคือ ใบพัด เนื่องจากใบพัดมีหน้าที่ในการพา UAV ไปยังสถานที่ต่างๆ ในระหว่างการใช้งาน UAV มักเกิดความเสียหายจากการลงจอด เนื่องจากกระแทกกับกิ่งไม้หรือ โขดหิน จากการบังคับทำให้ใบพัดเกิดการแตกหักและฉีกขาด เมื่อใบได้รับความเสียหายจะส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบอื่นๆ ด้วยเช่นกัน จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนใบพัดซึ่งมีราคาสูง โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตใบพัดได้แก่ ไม้ เหล็ก อลูมิเนียมและคอมโพสิต ซึ่งคอมโพสิตได้รับความนิยมในการนำมาผลิตเป็นใบพัด UAV เนื่องจากมีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ คอมโพสิตที่ใช้ทำใบพัดมีอีพ็อกซีเรซินเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งอีพ็อกซีเรซินมีความสามารถในการยึดเกาะกับเส้นใยได้ดี มีความเป็นขั้วสูง มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี และเพิ่มความมันวาวให้แก่ใบพัด เมื่อพิจารณาจากส่วนประกอบที่ใช้ผลิตใบพัดอากาศยานไร้คนขับ พบว่าสมบัติของอีพ็อกซีเรซินมีความแข็ง แต่เปราะ แตกหักง่ายมีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำ เมื่อได้รับแรงกระทำ จึงอาจเป็นเหตุทำให้ใบพัดการแตกหักได้ เพราะเป็นส่วนที่อยู่นอกสุด (Kotmarowska, 1999) จากข้อเสียดังกล่าวมีแนวคิดหาวิธีปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน เพื่อให้สามารถรับแรงกระแทกเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาดให้ดีขึ้น เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับใบพัด UAV เมื่อมีการนำไปใช้งาน

ดังนั้นจึงได้นำยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์มาใช้ปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน และสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นใบพัดอากาศยานไร้คนขับได้ ทั้งนี้พบว่าอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์มีหมู่ อีพ็อกไซค์เช่นเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าสามารถผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อการฉีกขาดปรับตัวดีขึ้น โดยยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ได้จากการคัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติบริเวณพันธะคู่ ซึ่งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ ส่งผลให้มีสมบัติความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น และยึดติดได้ดีกับวัสดุที่มีความเป็นขั้ว แต่หลังจากมีการเติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ลงในอีพ็อกซีเรซิน พบว่าสมบัติด้านความแข็งและความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งมีผลต่อการเสียรูปเมื่อได้รับแรงลมทำให้มีผลต่อการทรงตัว จึงได้มีการใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรงและที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนมาเป็นส่วนช่วยในการเพิ่มสมบัติดังกล่าว วัสดุระดับนาโนมีขนาดอนุภาค 100 นาโนเมตรหรือต่ำกว่า สารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้ในงานวิจัยคือนาโนซิลิกา เนื่องจากในอุตสาหกรรมได้มีการนำนาโนซิลิกามาใช้กับยางและอีพ็อกซีเรซินเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล โดยนาโนซิลิกามีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับอีพ็อกซีเรซินและยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ จึงสามารถผสมเข้ากันได้ดีสามารถยึดอายุการใช้งานของใบพัดได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของนาโนคอมโพสิตโดยการแปรปริมาณยาง ENR 50 และยาง ENR 50 ผสมกับนาโนซิลิกาผสมกับอีพ็อกซีเรซินเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นใบพัดอากาศยานไร้คนขับ และนำองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษามาใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทางวิศวกรรม อุตสาหกรรมอากาศยาน และเทคโนโลยีอวกาศแก่ประเทศต่อไป

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 คอมโพสิตใบพัด

Jaiganesh และคณะ (2014) ได้ศึกษาออกแบบจำลองใบพัดอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ในลอน พบว่าคอมโพสิตโดยใช้ในลอนจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงและการกระแทกสูงเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมข้อดีของคอมโพสิตที่ใช้ในลอนเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมคือ สามารถผลิตเป็นใบพัดได้ง่ายและมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ

Anand และคณะ (2013) ได้ประดิษฐ์ชิ้นส่วนหางของใบพัดอากาศยานโดยใช้วัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้ว อีพ็อกซีเรซิน โฟม ีซีฟิ่ง และฮาร์ดเด็นเนอร์ พบว่าคอมโพสิตที่กล่าวมานำมาใช้แทนใบพัดที่เป็นอลูมิเนียมได้ถึงแม้ว่ากระบวนการผลิตจะมีต้นทุนที่สูงกว่าแต่สามารถลดเชื้อเพลิงและให้น้ำหนักที่เบากว่าเมื่อเทียบกับอลูมิเนียม

Madhusudhan และคณะ (2014) ได้ศึกษาออกแบบใบพัดอากาศยานที่ได้จากคอมโพสิต ซึ่งคาร์บอนไฟเบอร์ผสมอีพ็อกซีเรซินในการขึ้นรูปใบพัด จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตที่มีการใช้คาร์บอนไฟเบอร์มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับใบพัดที่ทำด้วยไม้และไม่ทำให้เกิดการเสีรูปหลังการใช้งาน

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าวัสดุที่นิยมใช้ในการผลิตใบพัดอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนในปัจจุบันจะเป็นคาร์บอนไฟเบอร์ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน เนื่องจากวัสดุชนิดนี้ให้สมบัติเด่น คือ มีน้ำหนักเบา และความแข็งแรงสูง ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาใบพัดโดรน ด้วยคอมโพสิตผสมเส้นใยคาร์บอนผสมอีพ็อกซีเรซิน และเลือกใช้ยางธรรมชาติปรับปรุงในส่วนของอีพ็อกซีเรซินจากแตกหักง่าย ซึ่งเป็นสมบัติที่ใบพัดอากาศยานไร้คนขับต้องการปรับปรุง

1.2.2 การปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน

Saleh และคณะ (2014) ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ยางธรรมชาติเหลวที่ผสมในอีพ็อกซีเรซิน เพื่อปรับปรุงสมบัติโดยใช้ Diamine เป็นสารคงรูป พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติเหลวทำให้ความแข็งแรงของอีพ็อกซีเรซินลดลง แต่ค่าความต้านทานต่อการแตกหักดีขึ้น

Seng และคณะ (2011) ได้ศึกษายางธรรมชาติเหลวต่อสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน พบว่าเมื่อแปรปริมาณของยางธรรมชาติเหลว ที่อัตราส่วน 3, 5, 7 และ 9 phr ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน พบว่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของอีพ็อกซีเรซินที่มีการเติมยางธรรมชาติเหลวในอัตราส่วนที่ 3 phr ให้สมบัติด้านการกระแทกสูงที่สุด

Chuayjuljit และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพ็อกซีกับยางธรรมชาติอีพอกไซค์ โดยแปรปริมาณหมู่อีพอกไซค์ 25, 45, 50, 60, 70 และ 80 % mol และปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกไซค์ที่ 2, 5, 7 และ 10 กรัม พบว่าที่ปริมาณหมู่อีพอกไซค์ 45% และปริมาณยางไม่เกิน 5 กรัม ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

Tan และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติเหลวกับยางธรรมชาติอีพอกไซค์เหลวเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวและช่วยปรับปรุงความแข็งแรงประของอีพอกซีเรซิน พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซค์เหลวที่ 3% สามารถให้สมบัติด้านความเหนียวและปรับปรุงความแข็งแรงของอีพอกซีเรซินได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติเหลว เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซค์มีความเข้ากันได้ดีกว่ายางธรรมชาติเหลว เพราะมีความเป็นขั้วเหมือนกัน

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซค์มีความเข้ากันได้ดีกับอีพอกซีเรซิน ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซค์มีสภาพความเป็นขั้วคล้ายกับอีพอกซีเรซิน ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้ทำการเลือกยางธรรมชาติอีพอกไซค์มาทำการศึกษา แต่พบว่าค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซค์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงนำสารตัวเติมเสริมแรงผสมลงในนาโนคอมโพสิตเพื่อเพิ่มสมบัติดังกล่าว

1.2.3 การปรับปรุงสมบัติของอีพอกซีเรซินโดยใช้นาโนซิลิกา

Kohn และ Pearson (2011) ศึกษาการใช้นาโนซิลิกาต่อความเหนียวที่เปลี่ยนแปลงไปในคอมโพสิตอีพอกซีเรซิน พบว่าความเหนียวที่เกิดขึ้นมีผลเนื่องจากการกระจายตัวที่ดีและขนาดอนุภาคเล็กของนาโนซิลิกา ส่งผลให้ช่วยลดความเหนียวที่เกิดขึ้น

Kothmann และคณะ (2015) ได้ศึกษาการใช้นาโนซิลิกาเพื่อปรับปรุงความล้าจากรอยแตกของอีพอกซีเรซิน โดยมีการแปรปริมาณที่ 5, 10, 15, 20, 25 wt% ใช้อุณหภูมิ 60 °C ในการผสม จากนั้นทำการทดสอบผสมลงในเบ้าพร้อมกับสารเคลือบที่อุณหภูมิ 60 °C อบที่ 110 °C เป็นเวลา 11 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราส่วน 15 wt% ของนาโนซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดีและสามารถปรับปรุงความล้าจากรอยแตกได้ แต่เมื่อปริมาณของนาโนซิลิกามากกว่า 15 wt% พบว่าความล้าจากรอยแตกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของนาโนซิลิกา ส่งผลให้กลายเป็นจุดอ่อนแอ

Ikeda และ Kohjiya (2014) ได้ทำการศึกษาซิลิกาเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลในยางธรรมชาติ พบว่าการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากซิลิกาเกิดการรวมตัวกันเอง ส่งผลให้มีการกระจายตัวในยางได้ไม่ดี

Chen และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาใช้น้ำยางธรรมชาติผสมกับนาโนซิลิกาโดยนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 14 นาโนเมตร พบว่าที่อัตราส่วน 4 wt% ของนาโนซิลิกาที่มีการกระจายตัวที่ดี โดยสามารถยืนยันผลได้จาก SEM

Lay และคณะ (2012) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติผสมนาโนซิลิกาเทียบกับซิลิกา พบว่าการใช้นาโนซิลิกาที่ปริมาณต่ำกว่า 2.5 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้ซิลิกาที่ปริมาณเท่ากัน ซึ่งมีค่าประมาณ 35 MPa การเติมนาโนซิลิกา 0.6 phr ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ได้ค่าสูงสุด

Zhang และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการเกิดอันตรกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสมนาโนซิลิกาผ่านพันธะไฮโดรเจนด้วยเทคนิค FTIR ผลการทดลองพบว่าของอีพ็อกซีเรซินผสมนาโนซิลิกามีหมู่ Carboxyl และ Hydroxyl โดยพบว่ามี การเลื่อนของตำแหน่งเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ต่ำลงจาก 1736 cm^{-1} เป็น 1728 cm^{-1} และจาก 3420 cm^{-1} เป็น 3414 cm^{-1} ซึ่งหมายถึงการเกิดอันตรกิริยาขึ้น และยังมีหมู่ Si-OH ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3435 เป็น 3414 และหมู่ -OH ซึ่งแสดงความเกี่ยวข้องกับนาโนซิลิกาปรากฏสัญญาณเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 1727 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ Carboxyl (-C=O) ในซิลิกานาโนคอมโพสิต เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่ซิลิกาซึ่งเป็นอีพ็อกซีเรซิน (1736 cm^{-1}) พบความเข้มของสัญญาณมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นส่วนแถบการดูดกลืนของหมู่ Hydroxyl จาก 3420 ถึง 3414 cm^{-1} เป็นตัวบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยา

Poompradub และคณะ (2014) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซิลิกาโดยผ่านกระบวนการเทคนิค sol-gel เพื่อใช้กับน้ำยาง พบว่านาโนซิลิกามีขนาดอนุภาคเท่ากับ 13-15 นาโนเมตร และนำมาเป็นสารตัวเติมให้กับน้ำยางสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนให้กับน้ำยาง

1.2.4 ศึกษาสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน

Kocaman และคณะ (2016) ศึกษาสมบัติของอีพ็อกซีเรซินด้วยที่ใช้สารทำให้เกิดการแข็งตัวที่ต่างกันคือ SAc-sebacic acid, MNA-methyl nadic anhydride, PhA-phthalic anhydride, MA-maleic anhydride, SA-succinic anhydride, cycloaliphatic polyamine Epamine PC 17, MXDA-m-xylenediamine, MI-2-methylimidazole และ polyamide จากผลการทดลองเป็นการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลเช่นความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งเทียบกับสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซิน พบว่า

อีพ็อกซีเรซินที่ทำการเชื่อมโยงด้วย MNA และ MXDA จะให้สมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเทียบกับสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงชนิดแอนไฮไดรด์ เนื่องจากเป็นสารกักคร่อนที่มีฤทธิ์เป็นกรดสูง

Boey และคณะ (1999) ศึกษาชนิดสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอีพ็อกซีเรซินด้วยเตาไมโครเวฟเทียบกับการอบด้วยเตาอบ โดยใช้สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในกลุ่มเอมีน 3 ชนิด ได้แก่ diamino diphenyl sulfone (DDS), diamino diphenyl methane (DDM) และ metaphenylene diamine (MPDA) พบว่า สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงมีผลต่อปริมาณการเกิดปฏิกิริยา โดยปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของ DGEBA/DDS จะต่ำ เมื่ออบด้วยไมโครเวฟ เนื่องจาก DDS ไม่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วน DDM และ MPDA มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาปริมาณของธรรมชาติอีพ็อกไซด์ผสมอีพ็อกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของใบ UAV
- 1.3.2 เพื่อศึกษาปริมาณของสารตัวเติมนาโนซิลิกาในยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ผสมอีพ็อกซีเรซินต่อสมบัติเชิงกลของใบพัด UAV
- 1.3.3 ศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุคอมโพสิต
- 1.3.4 ขึ้นรูปใบพัด UAV

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถปรับปรุงข้อเสียของตัวใบพัดอากาศยานไร้คนขับได้
- 1.4.2 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับยางธรรมชาติโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานกับตัวใบพัดอากาศยานไร้คนขับ
- 1.4.3 เผยแพร่ไปยังหน่วยงานที่ได้รับผลประโยชน์จากงานวิจัยนี้ ได้แก่ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำใบพัด UAV และอุตสาหกรรมอื่นๆ

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (3, 5, 7 และ 10 phr (part per hundred of epoxy resin)) ในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.5.2 ศึกษาอัตราส่วนของนาโนซิลิกา (1 - 5 phr) ในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน ที่อุณหภูมิห้อง

1.5.3 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลเช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการกระแทก

1.5.4 ขึ้นรูปใบพัด UAV จากวัสดุคอมโพสิตที่ให้อัตราส่วนที่ดีที่สุด

1.5.5 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อการแตกหัก UAV กับใบพัด UAV ต้นแบบ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned aerial vehicle, UAV) หรือ โดรน มีมากในท้องตลาดมักมีรูปร่างที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งสามารถควบคุมได้จากระยะไกลส่วนใหญ่ใช้ในการถ่ายภาพมุมสูง นอกจากนี้สามารถทำหน้าที่ในการค้นหาเป้าหมายและลาดตระเวนในบริเวณที่มีความเสี่ยงหรือมนุษย์เข้าถึงได้ยาก โดรนมีส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของ UAV

จากรูปที่ 2.1 ปัญหาจากการใช้งานคือ เกิดความเสียหายในส่วนของใบพัด เนื่องจากได้รับแรงกระแทกจากการลงจอด กระแทกกิ่งไม้หรือ โขดหินจากการบังคับทำให้เกิดการแตกหักและฉีกขาดได้ง่าย วัสดุที่นิยมผลิตใบพัด UAV เป็นวัสดุที่ได้จากคอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ อีพ็อกซีเรซิน และฮาร์ดเดนเนอร์ เป็นต้น (Anand *et al.*, 2013)

2.2 นาโนคอมโพสิต

นาโนคอมโพสิตเป็นวัสดุเชิงประกอบได้จากวัสดุที่อยู่ในรูปนาโนและวัสดุชนิดอื่นมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามตรงตามที่ต้องการ โดยนาโนคอมโพสิตมีองค์ประกอบสองส่วนคือ

2.2.1 เมทริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนประกอบหลักของคอมโพสิตที่มีทั้งความเหนียวและความแข็งแรงที่ต่ำ ดังนั้นหน้าที่ของเมทริกซ์จะมีช่วยช่วยในการถ่ายเทแรงจากการกระทำที่ได้รับจากภายนอกต่อสารตัวเติมและกำหนดรูปร่างของวัสดุคอมโพสิต

2.2.2 สารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี ถึงแม้จะเติมไปในปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับการคอมโพสิตโดยทั่วไป (Peang, 2007) ดังนั้นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดระดับนาโนจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และภาคอุตสาหกรรม ในการนำสารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดระดับนาโนมาใช้ งาน การทำไบพดปคติจะนิยมใช้อยู่ในรูปของคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์หลักเป็นเรซินที่มีข้อเสียคือ เปราะแตกหักได้ง่าย ดังนั้นยางธรรมชาติจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้ปรับปรุงข้อเสียของอีพ็อกซีเรซิน เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาด ด้านทานการกระแทกและช่วยปรับปรุงสมบัติการสึกกร่อน เป็นต้น (กฤษณา, 2557) เมื่อเทียบพอลิเมอร์เทอร์โมเซตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิเอสเทอร์ ไวนิลเอส-เทอร์เรซิน พบว่าอีพ็อกซีเรซินมีราคาแพงกว่าแต่ให้สมบัติดีกว่าในด้านป้องกันการกัดกร่อนและทนทานสภาพอากาศได้ดี จึงทำให้คุ้มค่ากับราคาเมื่อเทียบกับตัวอื่นๆ อีพ็อกซีเรซินสามารถใช้งานได้หลากหลายมีศักยภาพสูง จึงนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

2.3 คาร์บอนไฟเบอร์

คาร์บอนไฟเบอร์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมอีกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจในภาคอุตสาหกรรม การ เช่นผลิตรถอวกาศและเครื่องบินรวมถึงสิ่งของทั่วไปเช่น อุปกรณ์กีฬา เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีสมบัติที่เด่นๆ คือ น้ำหนักเบา และความแข็งแรงสูง นอกจากนี้คาร์บอนไฟเบอร์ยังเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีต่างๆ โดยคาร์บอนไฟเบอร์มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนเหมือนถ่านและแกรไฟต์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยคาร์บอน 90% คาร์บอนไฟเบอร์

เป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.005-0.10 มิลลิเมตร ประเภทของคาร์บอนไฟเบอร์มักจะใช้เกณฑ์ในการจำแนก 2 วิธี ดังนี้

2.3.1 แบ่งตามสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ ได้แก่

- คาร์บอนไฟเบอร์ชนิด UHM (Ultrahigh modulus) มีค่าโมดูลัส > 450 GPa
- HM (High modulus) มีค่าโมดูลัสระหว่าง 350-450 GPa
- IM (Intermediate modulus) มีค่าโมดูลัสระหว่าง 200-350 GPa
- HT (High tensile) มีค่าต้านทานแรงดึง (Tensile strength) > 3.0 GPa
- SHT (Super high tensile) มีค่าความต้านทานแรงดึง > 4.5 GPa

2.3.2 แบ่งตามชนิดวัสดุคิ เช่น พอลิอะคริไลไนทริล และพิทซ์ เป็นต้น ซึ่งพอลิอะคริไลไนทริล เป็นวัสดุคิที่อุตสาหกรรมนิยมใช้มากที่สุด

2.4 อีพ็อกซีเรซิน

อีพ็อกซีเรซินมีความต้านทานต่อไฟฟ้าสูงและมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง เมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์ (Brent, 2008) นอกจากนี้มีการยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี เมื่อมีการใช้เส้นใยเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต โดยอีพ็อกซีเรซินมีการหดตัวที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์และไวไนลอีเทอร์เรซินที่สามารถหดตัวได้ถึง 12 % โดยปริมาตร แต่อีพ็อกซีเรซินจะมีการหดตัวที่น้อยกว่าเพียง 5 % (Zarrelli *et al.*, 2002)

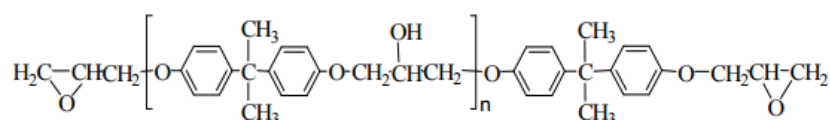
สมบัติของอีพ็อกซีเรซินในเชิงวิศวกรรม

- 1) ไม่มีการปล่อยก๊าซที่ส่งผลอันตรายในระหว่างขั้นตอนปฏิกิริยาการบ่ม
- 2) สามารถเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีความหลากหลายทางด้านความยืดหยุ่นมาเป็นตัวช่วยในการปรับปรุงสมบัติ
- 3) มีสมบัติการยึดเกาะกับวัสดุที่มีความเป็นขรุขระในโครงสร้าง

2.4.1 ประเภทของอีพ็อกซีเรซินทางการค้า

2.4.1.1 บิสฟีนอล-เอ-ไดโกลซิดิลอีเทอร์ (Bisphenol A diglycidyl ether)

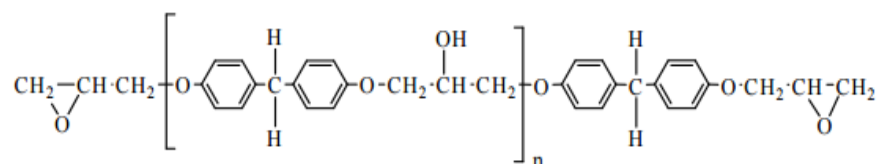
ไดโกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (DGEBA) ถูกผลิตขึ้นโดยปฏิกิริยาของบิสฟีนอลเอและอีพิกลอโรไฮดรินซึ่งมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนร่วม มีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินชนิดไดโกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (Irfan, 1998)

2.4.1.2 บิสฟีนอล เอฟ เบสอีพ็อกซีเรซิน (Bisphenol F based epoxy resins)

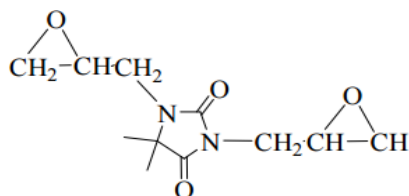
บิสฟีนอลเอฟของอีพ็อกซีเรซินเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอฟกับอีพิกลอโรไฮดรินจะได้ บิสฟีนอลเอฟของอีพ็อกซีเรซิน มีโครงสร้างแสดงรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของบิสฟีนอล เอฟ เบสอีพ็อกซีเรซิน (Irfan, 1998)

2.4.1.3 ไฮแดนโทอิน เรซิน (Hydantoin resins)

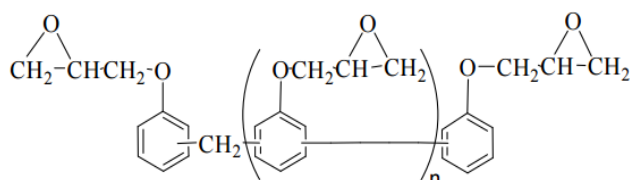
ไฮแดนโทอินเรซิน มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและให้สมบัติเชิงกลดี แต่อีพ็อกซีเรซินประเภทนี้มีปัญหาคือความเป็นพิษ มีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของไฮแดนโทอินเรซิน (Irfan, 1998)

2.4.1.4 โนโวแล็ก (Novolacs)

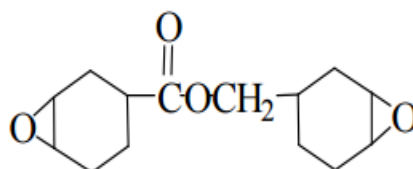
โนโวแล็กเป็นฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ที่ถูกอีพอกซิไดซ์หรือฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ที่ถูกแทนที่โครงสร้างของโนโวแล็กแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของโนโวแล็ก (Irfan, 1998)

2.4.1.5 เปอร์แอซิดเรซิน (Peracid resins)

เปอร์แอซิดเรซินมีลักษณะเป็นวงทำให้มีความหนาแน่นการเชื่อมขวางสูง เรซินชนิดนี้จะมีความหนืดและมีสีค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับชนิดโนโวแล็กและไดโกลซิคลีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเปอร์แอซิดเรซิน (Irfan, 1998)

อย่างไรก็ตามอีพอกซิเรซินยังแสดงถึงสมบัติคือเช่น ความต้านทานต่อการแตกหักต่ำ มีความแข็งเปราะ (Kotnarowska, 1999; Liu, 2011) จากข้อเสียดังกล่าวของอีพอกซิเรซิน จึงคิดนำยางธรรมชาติอีพอกไซด์มาปรับปรุงสมบัติอีพอกซิเรซิน เพราะมีหมู่ Oxyran ring คล้ายคลึงกับ Oxyran ring ในอีพอกซิเรซิน

2.5 คอมโพสิต

ปัจจุบันการใช้ยางเพียงชนิดเดียวในการทำเป็นผลิตภัณฑ์จะให้สมบัติไม่เพียงพอ ตัวอย่างเช่นในงานเชิงวิศวกรรมที่ต้องการสมบัติเชิงกลสูง เช่น ความแข็งแรงสูง โมดูลัสสูงและ

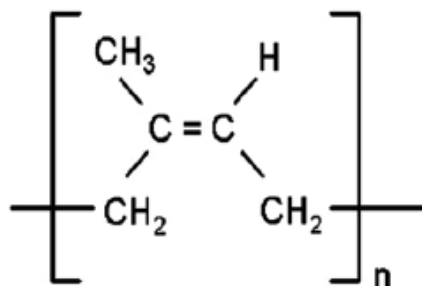
สมบัติการดูดซับพลังงานสูง หรือสมบัติการทนต่อการสึกกร่อนที่ดีเยี่ยม จำเป็นที่จะต้องใช้อย่างมากกว่าหนึ่งชนิดหรือเสริมแรงอย่างด้วยวัสดุอื่นเช่น เชม่าคำ ซิลิกา เส้นใยและโลหะ ในการทำเป็นผลิตภัณฑ์ สำหรับยางคอมพโอสิตการยึดติดกันระหว่างยางและวัสดุที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมบัติของยางคอมพโอสิต ทั้งชนิดรูปแบบ และการจัดเรียงตัวภายในโมเลกุลยาง เพื่อช่วยให้สามารถออกแบบยางคอมพโอสิตให้มีสมบัติได้หลากหลาย

2.6 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ หรือกระบวนการผลิตได้เป็นจำนวนมากเช่น นาโนคอมพโอสิตของยางและเคลย์ นาโนคอมพโอสิตของยางและซิลิกา ตัวอย่างของวัสดุใหม่ที่ได้จากการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้กับยาง/เคลย์ แสดงสมบัติการซึมผ่านของก๊าซลดลง ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น และสมบัติการหน่วงไฟที่ดีขึ้น

2.7 ยางธรรมชาติ สมบัติและส่วนประกอบ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีสูตรทางเคมีเป็น $(C_5H_8)_n$ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 มีชื่อเรียกว่า ไอโซพรีน (isoprene) มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบ *cis*-1,4-polyisoprene นำยางธรรมชาติที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ได้จากยางพันธุ์ *Hevea brasiliensis* ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ซึ่งส่งผลให้มีความสามารถในการแปรรูปได้ดี (บุญธรรม, 2530)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างยางธรรมชาติ

2.7.1 องค์ประกอบของน้ำยาง

น้ำยางเป็นของเหลวสีขาวมีสภาพเป็นสารคอลลอยด์ (Colloid) โดยอนุภาคของยางจะกระจายตัวในตัวกลางที่เป็นน้ำ มีรูปร่างกลมหรือรูปลูกแพร์ขนาด 0.05–5 ไมครอน มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5-7.0 และมีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร

น้ำยางสดมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่ไม่ใช่ยาง

2.7.1.1 ส่วนเนื้อยางคือส่วนที่เป็นสารประกอบไฮโดรเจน น้ำยางสดมีอนุภาคยางเป็นรูปกลมมีประจุไฟฟ้าที่ผิวเป็นขั้วลบ น้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45%

2.7.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันและสารประกอบอื่นๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบน้ำยางธรรมชาติ (สุนิสา, 2558)

ส่วนประกอบ	สัดส่วน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
สารพวกโปรตีน	1-1.2
สารพวกเรซิน	1
จีเอ็ม	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ (ปริมาณที่รวมกับสารอื่นแล้วเป็น 100)	64

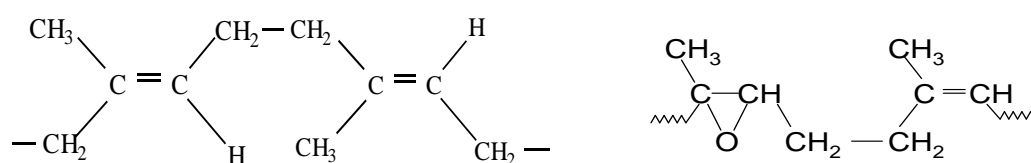
2.7.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) สามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้เมื่อถูกยืดทำให้มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงมาก ทำใหยางมีสมบัติเชิงกลดี ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือ มีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง และสมบัติด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ดี ขณะที่เกิดความร้อนสะสมภายใน (Heat build-up) ต่ำ แต่มีข้อเสียคือ เสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด

ออกซิเจน โอโซนและความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่มาก จึงมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมีดำ (สุนิสา, 2558)

2.8 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydised natural Rubber; ENR) เป็นการนำน้ำยางธรรมชาติมาดัดแปลงโครงสร้างผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันระหว่างยางกับกรดเปอร์ออกซี



ก. โครงสร้างยางธรรมชาติ

ข. โครงสร้างยางธรรมชาติอีพอกไซด์

รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบโครงสร้างของ (ก) ยางธรรมชาติ และ (ข) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการผลิตในทางการค้า ได้แก่ ENR 25 และ ENR 50 ซึ่งยาง ENR 25 เป็นยางที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ จำนวน 25 mol% และ ENR 50 เป็นยางที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ จำนวน 50 mol% ซึ่งยาง ENR ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างของยางโดยใช้สารเคมีพวกกรดเปอร์ออกซี (Peroxy acid) ที่มีความเข้มข้น 35 % ในการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ 25-100 mol% สภาวะทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันมีความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเป็ดวง สามารถตรวจสอบได้โดยการใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ซึ่งปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3600-3200, 1780 และ 1068 cm⁻¹ ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิลคาร์บอนิลและอีเธอร์ เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดพบแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 870 และ 1240 cm⁻¹ เป็นหมู่อีพอกซีและไม่พบแถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล จากเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ตรวจสอบโครงสร้างเคมี พบพีคที่ตำแหน่ง 2.7 และ 5.05 ppm เป็นพีคของคาร์บอนที่ตำแหน่งของอีพอกซีและคาร์บอนที่ตำแหน่งของพันธะคู่ แสดงการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันและพบหมู่อีพอกซีที่เกิดขึ้นในโครงสร้างยางธรรมชาติจะเป็นแบบสุ่ม สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีความเป็นขี้และทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมสูง มีคุณสมบัติในการยึดติดได้ดีกับวัสดุที่มีขี้ โดยที่มี

จำนวน โมลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงจะมีการซึมผ่านของก๊าซน้อย มีความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง (สุวดี, 2008)

จากสภาพความเป็นขี้ของยางธรรมชาติที่ออกไซด์และออกซิเรซินส่งผลให้ความเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้เป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกล แต่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งค่าความแข็งแรงมีผลทำให้ใบพัดเกิดการเสียวรูปในระหว่างการใช้งาน จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการเติมสารตัวเติมเสริมแรงในที่นี้เลือกใช้ซิลิกาขนาดระดับนาโนสเกลลงไปเพื่อปรับปรุงค่าดังกล่าว

2.9 ซิลิกา

ซิลิกาเป็นวัสดุสำคัญในด้านอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากช่วยในเรื่องความต้านทานต่อแรงกระแทก ลดการสะสมความร้อน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น (Kohjiya และ Ikeda, 2003) แต่อย่างไรก็ตามปัญหาในการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงยังคงมี โดยเกิดการจากรวมตัวกันเองของซิลิกาทำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวในยางได้ยาก เนื่องจากขนาดอนุภาคของซิลิกามีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีความเข้ากันได้ น้อยลง และส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกากับยาง มีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง (Kohjiya, 2003; Ikeda, 2004)

2.10 สารเชื่อมโยง

2.10.1 สารเชื่อมโยง (hardener) เป็นสารประกอบที่มีความว่องไวทางเคมีที่เปลี่ยนอิพอกซีเรซินให้เป็นของแข็ง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อม โยงพันธะเป็น โครงร่างแบบตาข่าย 3 มิติ ที่ไม่สามารถหลอมเหลวได้ (Chikhi *et al.*, 2002) ส่วนการบ่มเร่งสามารถทำได้ง่ายตั้งแต่อุณหภูมิ 5-150 °C ขึ้นอยู่กับสารเชื่อมโยงที่ใช้ สารคงรูปที่ใช้กันแบ่งได้ 4 ประเภท ดังนี้

1 สารเชื่อมโยงเอมีน (Amine) เหมาะสำหรับงานยึดเกาะและเคลือบแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ เอมีนโซ่ตรงและอนุพันธ์ กลุ่มนี้มีความหนืดต่ำ มีความว่องไวสูงและเกิดการเชื่อมขวางกันอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง กลุ่มที่สองเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไซโคลเอมีนและเทอร์เทียรี่เอมีนโซ่ตรง กลุ่มนี้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าพวกอะโรมาติกเอมีนแต่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากลุ่มสุดท้ายคืออะโรมาติกเอมีน ทำปฏิกิริยากับอิพอกซีเรซินที่อุณหภูมิสูงและมีเวลาในการทำปฏิกิริยานาน เนื่องจากมีโครงสร้างของวงเบนซีน

2 สารเชื่อมโยงชนิดกรดแอนไฮไดรด์ (Acid anhydride) เป็นสารเชื่อมโยงที่มีอายุการใช้งานนาน และการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนต่ำในขณะการเกิดปฏิกิริยา แต่มีข้อเสียคือเกิดฟองในผลิตภัณฑ์

3 สารเชื่อมโยงชนิดกรดลิวอิส (Lewis acid agents) กรดลิวอิส เช่น โบรอนไตรฟลูออไรด์ ใช้เป็นสารเชื่อมโยงที่มีอายุการใช้งานนานและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Tg) สูง เป็นสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นงานแผ่นมากกว่างานหล่อ

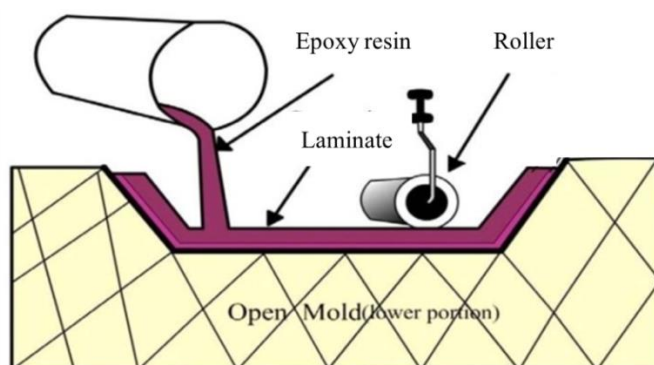
4 สารเชื่อมโยงชนิดพอลิเอไมด์ (Polyamides) พอลิเอไมด์เป็นสารเชื่อมโยงที่มีราคาถูก สามารถผสมได้หลายอัตราส่วน มีสมบัติเชิงกลดี สามารถกำหนดอายุการใช้งานได้ตามความต้องการ และสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิสูงเล็กน้อย (Lee *et al.*, 1982)

จากงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติสมบัติของวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตใบพัด UAV และได้นำวัสดุดังกล่าวมาศึกษาการขึ้นรูปด้วยเทคนิคต่างๆ ดังหัวข้อ 2.11

2.11 เทคนิคขึ้นคอมโพสิต

2.11.1 Hand-layup

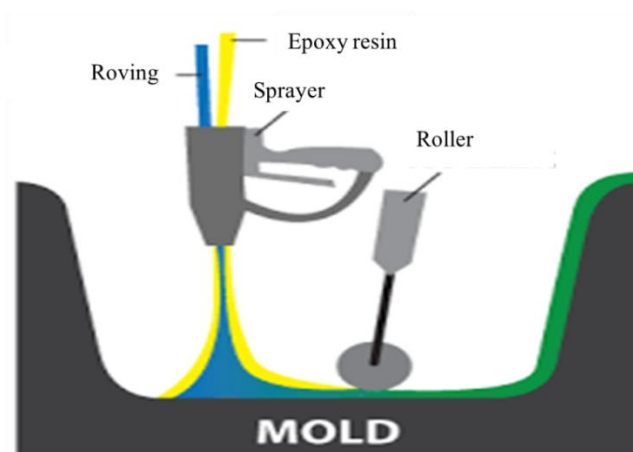
Hand-layup เป็นเทคนิคที่ใช้ขึ้นรูปแบบเรียบง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลาย ประสิทธิภาพของชิ้นงานขึ้นอยู่กับความชำนาญของบุคคล โดยวิธีการขึ้นรูปของกระบวนการ Hand-layup มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกจัดวางเส้นใยลงบนแม่พิมพ์แบบเปิด แล้วทำการเทอีพ็อกซีเรซินบนเส้นใยชั้นแรก จากนั้นวางเส้นใยอีกหนึ่งชั้นแล้วทาอีพ็อกซีเรซิน ทำสลับไปมาจนกระทั่งได้ความหนาตามต้องการ จากนั้นไล่อากาศออกและปล่อยให้เกิดการคงรูปที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การขึ้นรูปแบบ Hand-layup

2.11.2 Spray-up

Spray-up เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยกระบวนการขึ้นรูปนั้นจะแตกต่างกับวิธีการขึ้นรูปแบบ Hand-layup คือนำเส้นแบบม้วนป้อนเข้าเครื่องพ่นที่มีตัวตัดอยู่ด้านหลังโดยมีการพ่นเส้นใยออกทางท่อพ่นพร้อมกับอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งมีคนคอยกลึงเส้นใยกับอีพ็อกซีเรซินแบบติดกับแบบพิมพ์ จนกระทั่งได้ความหนาตามต้องการ ปล่อยให้แห้งแล้วแกะออกจากแบบพิมพ์ ซึ่งวิธีแบบ Spray-up นั้นจะมีต้นทุนต่ำเหมาะกับงานในแนวตั้งที่มีขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 2.10

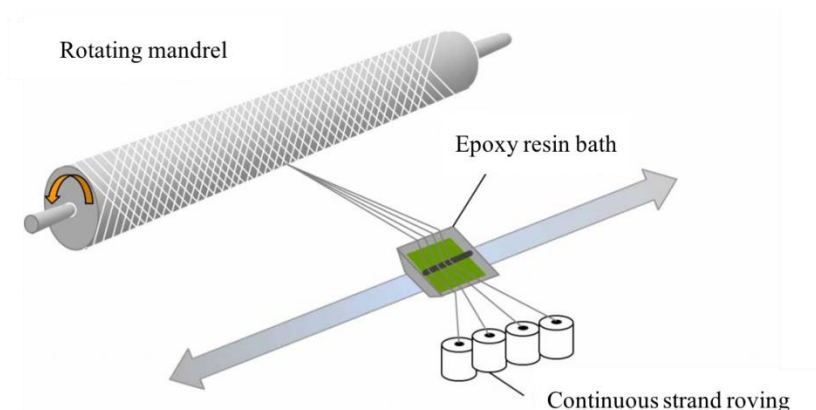


รูปที่ 2.10 การขึ้นรูปแบบ Spray-up

จากการขึ้นรูปทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเหมาะกับการทำชิ้นงาน เช่น หลังคารถ แก้ว กระจก และถังขนาดเล็กถึงกลาง ที่ต้องการความแข็งแรง แต่มีน้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อน เป็นต้น

2.11.3 Filament Winding

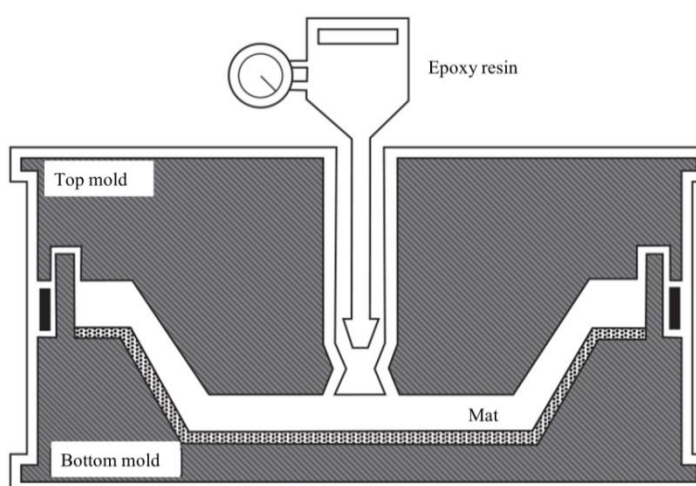
Filament winding เป็นวิธีสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกเท่านั้น โดยจะมีท่อและถังต่างๆ เป็นส่วนประกอบ โดยป้อนเส้นใยแบบม้วนเส้นได้ เส้นใยวิ่งผ่านอ่างอีพ็อกซีเรซิน ขึ้นไปพันกับแบบพิมพ์ที่เป็นทรงกระบอกทาบไปมาจนทั่วแบบพิมพ์แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นจึงนำออกจากแบบพิมพ์ ซึ่งลักษณะของชิ้นงานจะเป็นท่อกลวงใช้ในงานท่อหรือถังเท่านั้น แสดงดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 การขึ้นรูปแบบ Filament winding

2.11.4 Resin Transfer Molding

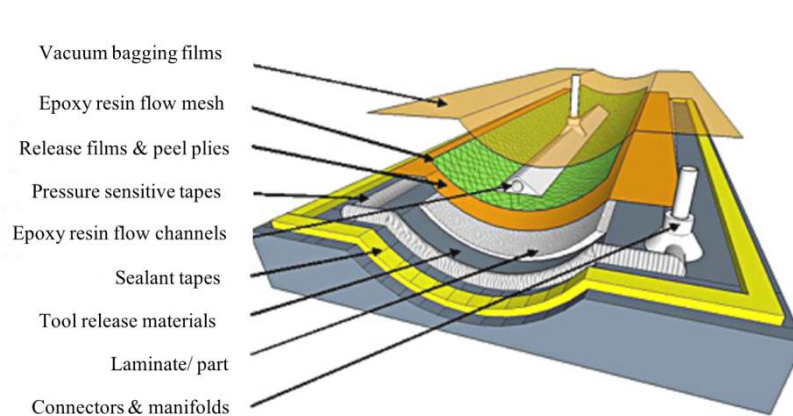
Resin Transfer Molding (RTM) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้แบบพิมพ์ประกบ โดยทำการปิดแบบพิมพ์ตัวผู้กับตัวเมียให้สนิท ฉีดอีพ็อกซีเรซินเข้าไปในแบบพิมพ์ให้ทั่ว ภายในประกอบด้วยเส้นใย ที่งไว้ให้แห้งแล้วเปิดแบบพิมพ์เพื่อถอดชิ้นงานออกแสดงดังรูป 2.12 ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปด้วย RTM คือ ชิ้นงานมีผิวที่เรียบทั้งสองด้าน แต่ต้นทุนสูง แต่วิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียในเรื่องของน้ำหนักที่มาก



รูปที่ 2.12 การขึ้นรูปแบบ Resin Transfer Molding

2.11.5 Infusion

Infusion เป็นเทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน โดยอาศัยแม่พิมพ์ ซึ่งทำการวางเส้นใยลงไปแบบพิมพ์แล้วซีลแบบพิมพ์ให้สนิทด้วยฟิล์มเพื่อกันรั่ว ต่อมาใช้ปั๊มดูดอากาศออกเพื่อให้เป็นสุญญากาศ ปล่อยให้ฟ็อกซีเรซินไหลเข้าแบบพิมพ์ด้วยแรงดูดของปั๊ม แต่จะมีส่วนเกินของฟ็อกซีเรซินในระบบนี้น้อย เพราะจะมีระบบการดูดฟ็อกซีเรซินส่วนเกินออก รอให้แห้งแล้วแกะชิ้นงานออกแสดงดังรูป 2.14 ข้อดีของระบบนี้มีชิ้นงานมีน้ำหนักเบาว่าทุกระบบการขึ้นรูปและมีความสม่ำเสมอของชิ้นงาน ข้อเสียคือสิ้นเปลืองวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป (Epotec, 2014)



รูปที่ 2.13 การขึ้นรูปแบบ Infusion

งานวิจัยนี้เลือกวิธีการขึ้นรูปแบบ Infusion เนื่องจากเป็นวิธีเหมาะสมแก่การขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ เพราะต้องการให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเบาและมีความสม่ำเสมอของชิ้นงาน

2.12 เทคนิคการวิเคราะห์คอมโพสิต

2.12.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีที่ใช้อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ในช่วง $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ ให้ค่า Sensitivity สูง และสามารถใช้ในการตรวจวัดแสงที่มีความเข้มสูง ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์พหุสัจพจน์และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร แสดงดังรูป 2.14 การเตรียมชิ้นตัวอย่างมีทั้ง

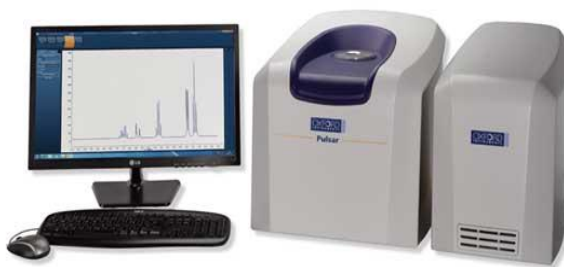
แบบของแข็ง แบบผง และของเหลว ซึ่งแบบของแข็งเช่นยางหรือพลาสติกเตรียมเป็นแผ่นบางๆ แล้วทำการวัด ส่วนแบบผงโดยนำตัวอย่างละลายในตัวทำละลาย แล้วทำการวัดเหมือนกับของเหลว



รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์ FTIR

2.12.2 Proton Nuclear Magnetic Resonance ($^1\text{H-NMR}$) Spectroscopy

โปรตรอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี หรือมีชื่อย่อว่า $^1\text{H-NMR}$ เป็นเทคนิคเกี่ยวข้องกับการวัดระดับพลังงานที่แตกต่างกันของนิวเคลียสของโปรตรอนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก เทคนิคนี้มีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาเกี่ยวกับสูตรโครงสร้างของสารไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์หรือสารประกอบพอลิเมอร์ และยังสามารถนำมาใช้ในการหาปริมาณวิเคราะห์ได้อีกด้วยเช่น สามารถศึกษาหาสัดส่วนของพอลิเมอร์ การกระจายตัวของมอนอเมอร์เป็นต้นพวกสารหรือสารประกอบอินทรีย์ สามารถใช้ $^1\text{H-NMR}$ อาจใช้ความถี่ต่ำหรือที่อุณหภูมิต่ำพิกที่ได้แหลมคมชัด แต่กรณีของสารหรือสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักสูง ถ้าใช้ $^1\text{H-NMR}$ ที่ความถี่และอุณหภูมิต่ำจะได้พิกกว้าง หรืออาจจะเกิดการคัปปลิง (Coupling) แสดงเครื่อง $^1\text{H-NMR}$ ดังรูป 2.16 ตัวอย่างการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ โดยทำการชั่งสารตัวอย่างตามปริมาณที่กำหนด ใส่ใน Vial แล้วใช้ Dropper ดูดตัวทำละลายหยดใส่ vial 0.5-0.6 มิลลิลิตร แล้วใช้ Dropper ดูดสารละลายใน Vial ไปใส่ในหลอดให้สูงประมาณ 3-4 เซนติเมตร จากนั้นปิดแล้วนำไปทดสอบ ผลการทดสอบต้องทำการวิเคราะห์ NMR สเปกตรัม ตัวอย่างการวิเคราะห์ คือจะดูค่า Chemical shift ว่าโปรตอนเกาะอยู่ที่คาร์บอนหมู่ใดและค่า Integrating เพื่อหาจำนวนของโปรตอน ดูพิกว่าพิกเป็นโปรตอนใด และหา peak splitting เพื่อดูจำนวนโปรตอนที่อยู่ข้างเคียง



รูปที่ 2.15 เครื่องวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$

2.12.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งมีการสร้างภาพที่ได้จากเครื่อง SEM เป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์ได้โดยตรง จากการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา เช่น ระดับการกระจายตัว ขนาด รายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ตัวอย่างตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ และรูปร่างของแต่ละเฟสของตัวอย่างวัตถุที่นำมาศึกษา ตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดึง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้เพิ่มเติม ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการสนับสนุนผลการทดสอบสมบัติด้านอื่นๆ ของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายและ โครงสร้างโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิเมอร์หลังจากผ่านกระบวนการผสมหรือได้รับแรงมากระทำ

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม นิยมเตรียมจากการแตกหักหรือการตัดชิ้นงานตัวอย่างและทำการถ่ายภาพบริเวณภาพตัดขวางที่ได้จากชิ้นงาน ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผงจะใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็งควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วแต่ภาชนะที่รองรับด้วย ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 เครื่องวิเคราะห์ SEM

2.12.4 Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA ใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูง ที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่กำหนดด้วยผู้ทดลอง ทำให้เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) เนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟสในการวิเคราะห์ ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง ซึ่งอยู่ในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน) หรือแก๊สที่มีความว่องไว (อากาศหรือออกซิเจน) โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย หรือการย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ TGA สามารถใช้เป็นผง ก้อนหรือแผ่น ในกรณีตัวอย่างเป็นก้อนหรือแผ่น ตัดให้มีขนาดพอที่จะใส่ใน Crucible ประมาณ 5 มิลลิเมตร สูงไม่เกิน 2-3 มิลลิเมตร กรณีเป็นผงใช้ประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ถึง 20 มิลลิกรัม ขึ้นกับความหนาแน่นของชิ้นงาน



รูปที่ 2.17 เครื่องวิเคราะห์ TGA

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1. สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีและวัสดุ

3.1.1.1 นำยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 50 เปอร์เซนต์โมล (ENR 50) เป็นของเหลวมีปริมาณเนื้อยางแห้ง 33.89 % ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันประมาณที่ $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จาก Muang Mai Guthrie Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.1.2 Hardenner (polyamine resin) ชนิด Th 7255 เป็นของเหลวใสสีเหลืองทำให้เกิดการแข็งตัวของอีพอกซีเรซิน มีค่าความหนาแน่นประมาณ 1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จาก Neotech Composite Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.1.3 อีพอกซีเรซินชนิด YD 535 LV ลักษณะสีขาว น้ำหนักโมเลกุล 700 กรัมต่อโมล ค่าความหนาแน่นประมาณ 1.15กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จาก Neotech Composite Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.1.4 Nanosilica TM - 40 colloidal silica 40 %wt มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 1.28-1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร น้ำหนักโดยเฉลี่ยของนาโนซิลิกา 60.08 กรัมต่อโมล และมีพื้นที่ผิวประมาณ 135.9 กรัมต่อตารางเมตร จากห้างหุ้นส่วน Boss Ofical Limited Partnership จำกัด ประเทศไทย

3.1.1.5 แผ่นไฟเบอร์คาร์บอน มีลักษณะเป็นเส้นใยสีดำแบบประสาน มีการจัดเรียงตัวแบบมุม 90 องศา มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.005-0.010 มิลลิเมตร จากเส้นผ่าศูนย์กลาง มีค่าความหนาแน่น 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จาก Neotech Composite Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.1.6 แผ่นกาวปิดขอบ รุ่น Sealant Tape 5354 ใช้สำหรับปิดขอบเพื่อป้องกันอากาศรั่วไหลขณะแวกคัม

3.1.1.7 แผ่นฟิล์มสุญญากาศ รุ่น VACFILM 200G มีสมบัติกันน้ำและฝุ่น ทนอุณหภูมิสูง ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ จาก Neotech Composite Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 แม่พิมพ์โลหะ มีลักษณะเป็นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ มีขนาดความยาว 60 เซนติเมตร ความกว้าง 25 เซนติเมตร เป็นพิมพ์แบบประกบตัวผู้กับตัวเมียที่ใช้ในการขึ้นรูปใบพัด

3.1.2.2 กระจก ลักษณะเป็นกระจกนิรภัยใสขนาด 1000 x 1000 ตารางมิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปขึ้นทดสอบสมบัติของวัสดุใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

3.1.2.3 เครื่องปั๊มสุญญากาศ รุ่น VP-150 ความจุ 150 ลิตรต่อนาที มีช่องดูด 1/4 Flare Lubricating Oil 280 ml ใช้สำหรับแวกคัมมื่อฟ็อกซีเรซินในกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

3.1.2.4 ถังพักอ็อกซีเรซิน โดยมีถังพักอ็อกซีเรซินพร้อมมาตรวัดความดัน มีความจุถึง 1 ลิตร ใช้สำหรับเก็บอ็อกซีเรซินส่วนเกินจากการแวกคัมมื่อในกระบวนการขึ้นรูป

3.1.2.5 เครื่อง CNC โดยเครื่อง CNC 3 D มี 3 แกนแกน ขนาด 700 x 700 x 50 มิลลิเมตร ใช้สำหรับกระบวนการตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบ

3.1.2.6 เครื่องกวนสาร ใช้สำหรับกวนผสมสารเคมีหรือสารละลายเพื่อใช้ในการขึ้นรูป

3.1.2.7 เครื่องชั่ง เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลเป็นเครื่อง A&D Weighing SJ Portion Scales รุ่น SJ-20KHS ขนาด 20 ± 0.01 กิโลกรัม มีความละเอียดสูงใช้ในการชั่งน้ำหนักของสารเคมีในกระบวนการต่างๆ

3.2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างเคมีของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค FTIR และ $^1\text{H-NMR}$

ยาง ENR 50 ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง 33.89 % อยู่ในรูปน้ำยาง โดยตรวจสอบหาปริมาณเปอร์เซ็นต์โมลีโอพอกไซค์ของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อยืนยันผลจากตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติโอพอกไซค์ ทั้งนี้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การเกิดหมู่โอพอกไซค์ของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรที่ 3.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเกิดหมู่โอพอกไซค์} = \frac{I_{2.70}}{I_{2.70} + I_{5.14}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.2 เตรียมแบบพิมพ์จากน้ำยางธรรมชาติ

ขั้นตอนการเตรียมแบบพิมพ์ยาง ชั้นแรกนำน้ำยางชั้นผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆ เป็นน้ำยางคอมปาวด์ตามสูตรดังตารางที่ 3.1 เพื่อนำไปขึ้นรูปแบบพิมพ์ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 3.1 สูตรน้ำยางคอมปาวด์

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	สารเคมี	ปริมาณ (phr)
น้ำยางชั้น	100	50% ZDEG	1
10% KOH	0.4	50% Wingstay L	1
20% K-oleate	1	50% ZMBT	0.5
50% Sulfur	1	50% ZnO	1

3.2.2.1 กรองน้ำยางคอมปาวด์ใส่ภาชนะบรรจุปิด

3.2.2.2 นำขึ้นแบบตัวอย่างวางลงบนถาดอะลูมิเนียม

3.2.2.3 เทน้ำยางคอมปาวด์ลงบนถาดอะลูมิเนียมที่มีแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานวางอยู่ โดยเทจากจุดเดียวให้น้ำยางไหลจนทั่วแบบชิ้นงานทดสอบต่างๆ ป้องกันการเกิดฟองอากาศ

3.2.2.4 จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมเข้าสู่กระบวนการอบ โดยอบในตู้อบลมร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 70°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

3.2.2.5 นำแบบพิมพ์ (ดังรูปที่ 3.1) ออกจากตู้อบ ตั้งทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง แกะชิ้นตัวอย่างออกจากถาดอะลูมิเนียม แล้วตัดตกแต่งขอบแบบพิมพ์ เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.1 แบบพิมพ์ทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้จากยางธรรมชาติ

3.2.3 อิทธิพลของคอมโพสิทอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

การแปรปริมาณยาง (ENR 50) ในอิพ็อกซีเรซินเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอิพ็อกซีเรซิน เหนือยาง ENR 50 มีหมู่เอพอกไซด์ที่เหมือนกันกับหมู่เอพอกไซด์ภายในโครงสร้างของอิพ็อกซีเรซิน จึงคิดว่ามีความเข้ากันได้ดีซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของอิพ็อกซีเรซิน

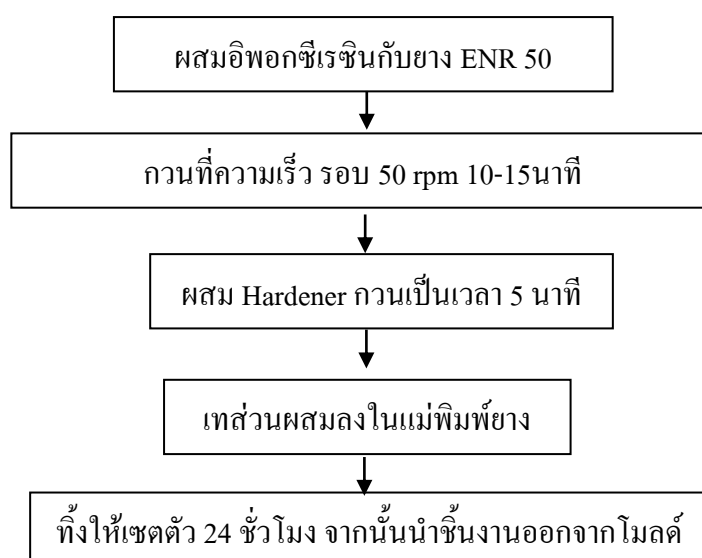
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของอิพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50

สูตร	ปริมาณ (phe*)				
Epoxy resin	100	100	100	100	100
ENR 50	0	3	5	7	10
Hardener	35	35	35	35	35

หมายเหตุ:* phe (part per hundred of epoxy resin)

3.2.3.1 วิธีการผสมคอมโพสิทอิพ็อกซีเรซินกับยาง ENR 50

วิธีการผสมอิพ็อกซีเรซินกับยาง ENR 50 ทำโดยนำสารเคมีที่ได้จากการเตรียมในตารางที่ 3.2 มาผสมตามขั้นตอนที่ได้ศึกษาไว้เพื่อลดปัจจัยที่อาจส่งผลต่อสมบัติที่ได้จากชิ้นงานซึ่งมีกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการการผสมอิพ็อกซีเรซินกับยาง ENR 50

3.2.4 อธิพผลของคอมโพสิทอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา

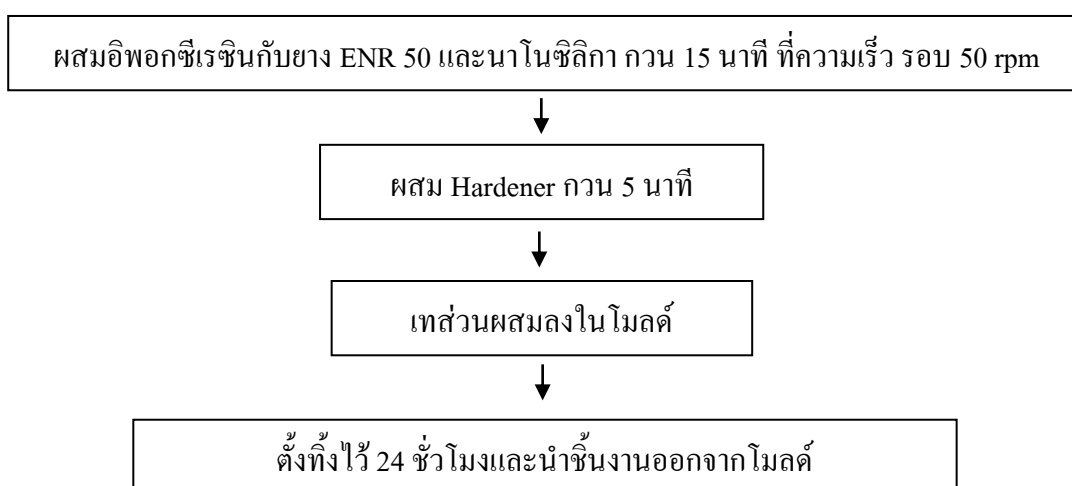
จากการศึกษาอิทธิพลของอิพ็อกซีเรซินที่ผสมยาง ENR 50 เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดของยาง ENR 50 ที่แปรปริมาณนาโนซิลิกาเพื่อเทียบสมบัติเชิงกล โดยใช้สูตรดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานาโนคอมโพสิท

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

3.2.4.1 ขั้นตอนการผสมนาโนคอมโพสิทอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

จากขั้นตอนการผสมยาง ENR 50 และอิพ็อกซีเรซิน มีความคล้ายกับขั้นตอนการผสมนาโนคอมโพสิทอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ต่างกันตรงที่มีการแปรปริมาณของนาโนซิลิกาผสมเข้าไป ซึ่งกระบวนการผสมแสดง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการผสมนาโนคอมโพสิท

3.2.5 ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.2.5.1 ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง

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

3.2.5.2 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด

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

3.2.5.3 ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก

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

3.2.5.4 ทดสอบสมบัติความแข็ง

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

3.2.5.5 ทดสอบความหนาแน่น

ความหนาแน่นของสารเป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและเป็นปริมาณที่บอกค่ามวลของสารในหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สูตรการหาความหนาแน่นของวัตถุ แสดงดังสมการ 3.1

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

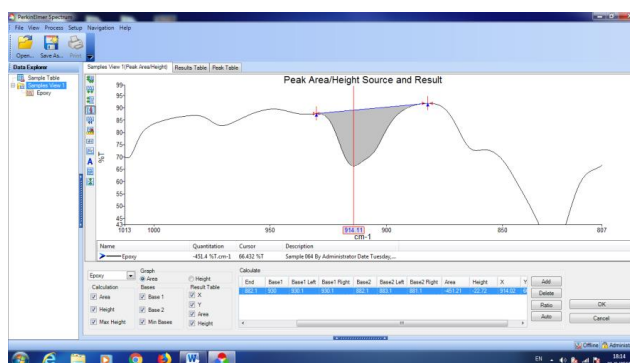
โดยที่ D คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M คือ มวลรวมของวัตถุ (กิโลกรัม)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (ลูกบาศก์เมตร)

3.2.5.6 การวิเคราะห์ด้วย 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 ตัวอย่างอิพ็อกซีเรซิน อิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 กับนาโนซิลิกาที่เตรียมขึ้น โดยเก็บข้อมูลที่ช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 4000 cm^{-1} ซึ่งใช้จำนวนการสแกน 32 ครั้งต่อสเปกตรัม ความละเอียด 2 cm^{-1} ทั้งนี้ยังสามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของพีคต่างๆ เพื่อใช้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยโปรแกรม FTIR

ทั้งนี้ยังสามารถดูการเกิดปฏิกิริยาได้ระหว่างสารผสมโดยดูจากอัตราส่วนความเข้มของพีค ใช้บอกถึงอัตราส่วนความเข้มของพีคของหมูนั่นว่ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการคำนวณหาอัตราส่วนความเข้มของพีค จะใช้ค่าแทนสูตรดังต่อไปนี้

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

3.2.5.7 วิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อน

สมบัติเชิงความร้อนของของตัวอย่างที่เป็นอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 กับนาโนซิลิกา ทำโดยใช้เทคนิค TGA หรือ Thermal gravimetric analysis จาก METTLER TOLEDO รุ่น TGA/DSC 3⁺ และอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 0 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน ใช้อัตราการไหลของก๊าซ 10 มิลลิเมตรต่อนาที

3.2.5.8 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง หัวกล้องชนิด 2 ตา (Binocular Microscope) ยี่ห้อ Carl Zeiss ถ่ายภาพพื้นผิวของอีพ็อกซีเรซินอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 กับนาโนซิลิกา จากชิ้นทดสอบความต้านทานการกระแทก ที่กำลังขยาย 200 เท่า กับ 20 เท่า เพื่อดูการกระจายตัวและขนาดอนุภาค เพื่อใช้ในการอภิปรายผลการทดลอง

3.2.6 ลักษณะของแบบพิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

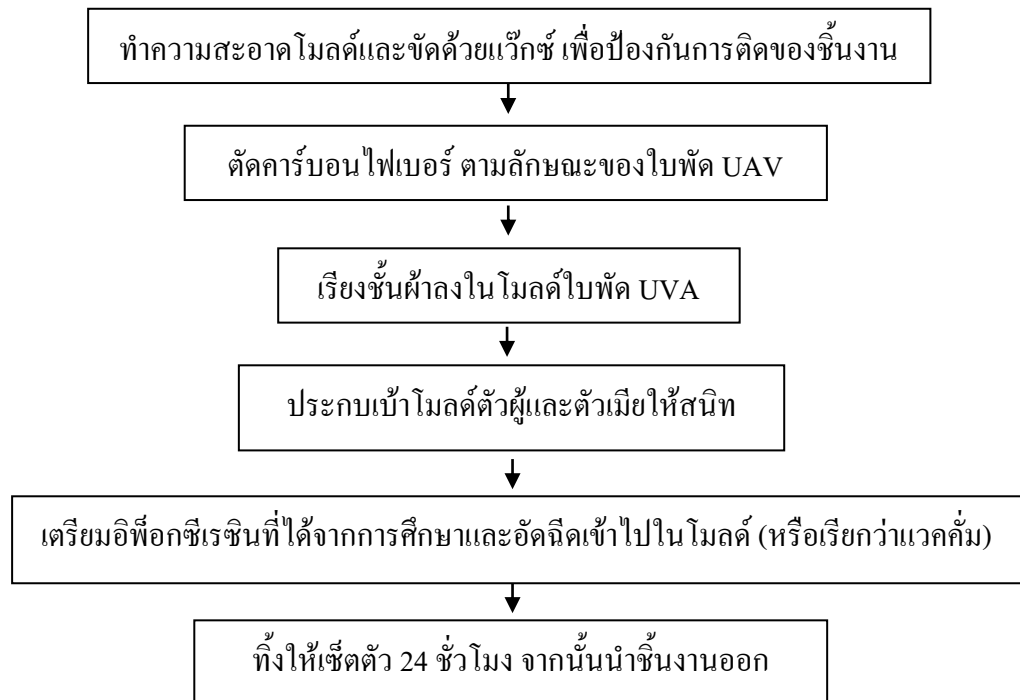
แบบพิมพ์ใช้ขึ้นรูปใบพัด UAV เป็นแบบพิมพ์เหล็ก มีลักษณะเป็นแบบพิมพ์ประกอบด้วยผู้กับตัวเมียมีขนาด ยาว 60 เซนติเมตร กว้าง 25 เซนติเมตร ด้านในแบบพิมพ์มีรูปร่างใบพัด โดยใช้เทคนิค Infusion ในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบพิมพ์เหล็กผลิตใบพัด UAV

3.2.7 การขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับด้วยเทคนิค Infusion

การขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับโดยใช้สูตรที่ทำการปรับปรุงอีพ็อกซีเรซินซึ่งให้สมบัติด้านการกระแทกที่ดีที่สุดมาขึ้นรูปกับคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อให้เป็นใบพัด UAV โดยผ่านกระบวนการ Infusion ขั้นตอนการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังการขึ้นรูปใบพัด

3.2.8 ทดสอบสมบัติของคอมโพสิตที่ขึ้นรูปใบพัด UAV

3.2.8.1 ทดสอบสมบัติการกระแทก (Impact strength)

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

3.2.8.2 ทดสอบสมบัติแรงดัดงอ (Flexural strength)

เตรียมขนาดชิ้นทดสอบ $127 \times 12.5 \times 3$ มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 790 เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการดัดงอและมอดูลัสการดัดงอด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ที่ใช้อัตราเร็ว 1.2 มิลลิเมตรต่อนาที (Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5K) ประเทศอิตาลี

3.2.8.3 ทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness)

การวัดความแข็งของอีพ็อกซีเรซินที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมักจะ ทดสอบความแข็งที่มีหน่วย Barcol ชิ้นงานเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D 2583 จากนั้นทำการทดสอบโดยวางชิ้นทดสอบภายใต้หัวกดของเครื่องทดสอบความแข็ง Barcol และให้แรงกดที่สม่ำเสมอกับชิ้นซึ่งค่าที่ได้จะถูกแปลงเป็นค่าความแข็งที่มีหน่วยเป็น Barcol

3.2.8.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอมโพสิตใบพัด UAV

กระบวนการเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานคอมโพสิตที่มีคาร์บอนไฟเบอร์เป็นส่วนประกอบ แสดงขั้นตอนดังนี้

1. ขัดผิวแม่พิมพ์กระจกโดยใช้เกรียงเหล็กชุบเอาเสยเรซินซึ่งอาจติดค้างอยู่บนผิวกระจก
2. ทำความสะอาดผิวแม่พิมพ์กระจกโดยเช็ดด้วยผ้าชุบน้ำยาถอดแบบหมาดๆ
3. ตัดคาร์บอนไฟเบอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดตามต้องการ
4. ตัดผ้า Peel Ply ให้พอดีขนาดของชิ้นงาน แล้วนำไปคลุมทับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แล้วแนบผิวผ้าให้เรียบสนิท
5. ตัดแผ่น Release Film ให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานเล็กน้อย แล้วนำไปวางบนแผ่น Peel Ply อีกที จากนั้นใช้เทปใสชนิดทนความร้อนยึดให้ติดกับแม่พิมพ์กระจก
6. ติดตั้งวาล์วดูดอากาศภายใน Bagging Film โดยวาล์วดูดอากาศต้องวางบน Breather และต้องไม่กดทับชิ้นงาน
7. ตัด Sealant Tape แปะตามขอบทุกขอบของ Bagging Film
8. ทำการ Vacuum อีพ็อกซีเรซินที่ได้รับการปรับปรุง และตั้งให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. ทำการแกะและลอกวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการผลิตทั้งหมดออก หลังจากนั้นทำการลอก แผ่น Laminate ออกจากแม่พิมพ์กระจก
10. ตัดแผ่น Laminate ด้วยเครื่อง CNC 3 มิติ ตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต UAV

บทที่ 4

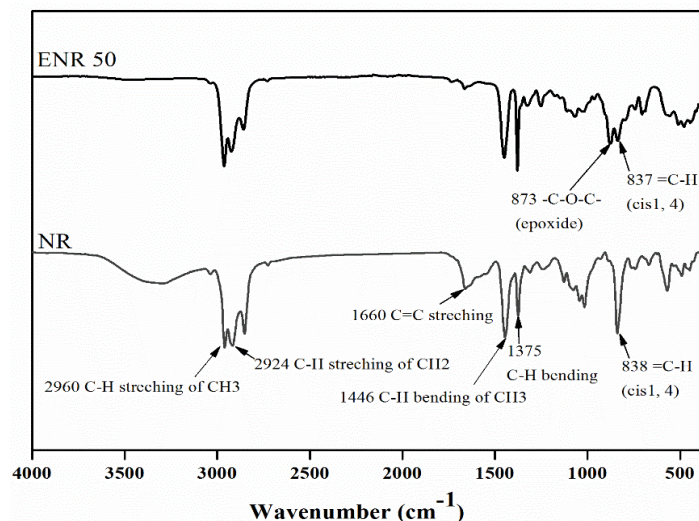
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการปรับปรุงสมบัติฟ็อกซีเรซินด้านความแข็งแรงเปราะ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ผลิตไบพดอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้อย่าง ENR 50 ผสมร่วมกับบิฟ็อกซีเรซินเปรียบเทียบกับการใช้บิฟ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา ทั้งนี้เพื่อหาอัตราส่วนที่สามารถปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้นและสามารถนำอัตราส่วนดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นไบพดอากาศยานไร้คนขับได้ ดังนั้นเพื่อยืนยันว่าได้มีการใช้อย่าง ENR 50 จริง จึงได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของยาง ENR 50 เทียบกับยางธรรมชาติด้วยเทคนิค FTIR และหาปริมาณของหมู่เอพอกไซด์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ แสดงดังนี้

Part I: วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติเอพอกไซด์

4.1 วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติเอพอกไซด์โดยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์สเปกตรัมของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิคเครื่อง FTIR เพื่อใช้วิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของหมู่เอพอกไซด์ โดยเปรียบเทียบสเปกตรัมของยางธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของยาง ENR 50 และยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.1 พบว่ายาง ENR 50 จะปรากฏหมู่เอพอกไซด์ตรงตำแหน่ง 873 cm^{-1} (Suchat *et al.*, 2014) ซึ่งเป็นตำแหน่งแถบการสั่นใหม่ที่ไม่ปรากฏในสเปกตรัมของยางธรรมชาติ

ในขณะที่ยางธรรมชาติจะปรากฏแถบการสั่นของพันธะคู่คาร์บอน (C=C bending) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 838 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับโครงสร้างของ *cis*-1,4-polyisoprene แต่ไม่พบการปรากฏแถบการสั่นที่ตำแหน่ง 873 cm^{-1} ในยางธรรมชาติ จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างของพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติที่มีหน่วยย่อยเป็น *cis*-1,4-polyisoprene เกิดการตัดแปร โมเลกุลด้วยวิธีอีพอกซิเดชัน โดยเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ที่เกิดขึ้นในยางธรรมชาติและยาง ENR 50 (Pithaksareetham *et al.*, 2018) แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของ NR และ ENR 50

Functional	Wavenumber (cm^{-1})	
	NR	ENR 50
C=C-H	838	837
-CH ₂ , -CH ₃	1446, 1375	1449, 1375
C=C	1660	1588
-CH ₂ , -CH ₃	2960, 2910, 2858	2962, 2924, 2858
C-O	-	873, 1251

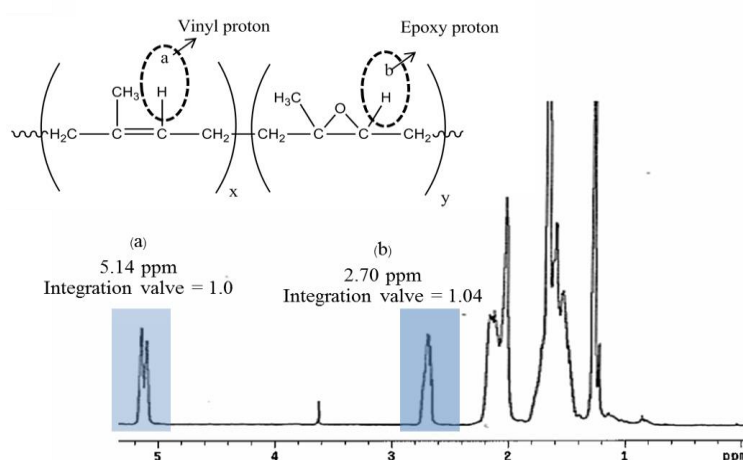
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของยาง ENR 50 ด้วยเทคนิค ¹H-NMR

ผลการทดลอง ¹H-NMR เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 พบว่าหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดขึ้นให้ค่า Integration value ที่ตำแหน่ง 2.70 ppm ซึ่งเป็นของหมู่ Epoxy proton มีความสอดคล้องกับผล FTIR และการหาปริมาณหมู่เอพอกไซด์โดยใช้เทคนิค ¹H-NMR สามารถหาได้จากค่าที่ได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง Vinyl proton และ Epoxy proton ภายในโครงสร้างยางธรรมชาติเอพอกไซด์ โดยพิจารณาค่าตำแหน่ง Chemical shift ที่ประมาณ 2.70 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดจากการหลุดของโปรตอนตรงตำแหน่งหมู่เอพอกไซด์ (COC-H) หรือเรียกว่า Epoxy proton โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.2b ในขณะที่ตำแหน่ง Chemical shift เท่ากับ 5.14 ppm เป็นตำแหน่งที่เกิดการหลุดของโปรตอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ในโครงสร้างเดิมของยางธรรมชาติ (C=C-H) หรือเรียกว่า Vinyl proton สอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Gan and Hamid (1997) โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.2a ดังนั้นปริมาณหมู่เอพอกไซด์
หาจากความสัมพันธ์ของการลดลงของพันธะคู่ในยาง ($I_{5.14}$) ต่อการเพิ่มขึ้นของหมู่เอพอกไซด์ ($I_{2.70}$)

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การเกิดหมู่เอพอกไซด์} &= [I_{2.70} / (I_{2.70} + I_{5.14})] \times 100 \quad (4.1) \\ &= [1.04 / (1.04 + 1.00)] \times 100 = 50.98 \% \end{aligned}$$

ผลจากเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ สามารถยืนยันว่ายางธรรมชาติเอพอกไซด์ที่ได้นำมาใช้ใน
งานวิจัยมีปริมาณหมู่เอพอกไซด์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โมล




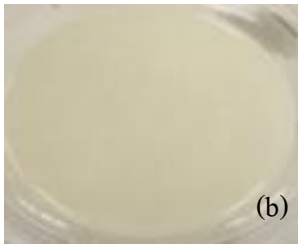

รูปที่ 4.2 สัญญาณ $^1\text{H-NMR}$ ของยาง ENR 50

Part II: ปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซินด้วยยาง ENR 50

4.1 ลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป

ลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูปอัตราส่วน
100:3:35 ได้พบลักษณะเบื้องต้นของสารในขณะผสมและระยะเวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูปต่อเวลาการผสม

เริ่มต้นทำการผสม	ผสมสารคงรูป 15 นาที	ผสมสารคงรูป 30 นาที
 (a)	 (b)	 (c)

ตารางที่ 4.2 เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูปเพื่อคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสี ความหนืดและเวลาในการแข็งตัวของตัวอย่าง พบว่าเมื่อนำอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ดังรูป (a) เกิดการแยกเฟสกันอย่างชัดเจนแต่หลังจากกวนเป็นเวลา 15 นาที ดังรูป (b) พบว่าสารทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ดีลักษณะเป็นสีขาวนวล และมีความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่หลังจากผสมกับสารคงรูปขึ้นงานมีลักษณะเป็นสีเหลืองมีความหนืดและความร้อนเกิดขึ้นในขั้นตอนการผสม เมื่อผ่านไป 30 นาที อีพ็อกซีเรซินที่ผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป เริ่มมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นแต่หลังจาก 24 ชั่วโมง อีพ็อกซีเรซินที่ผสมยาง ENR 50 และสารคงรูปมีการเซตตัว ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปไปอัดอากาศยานได้

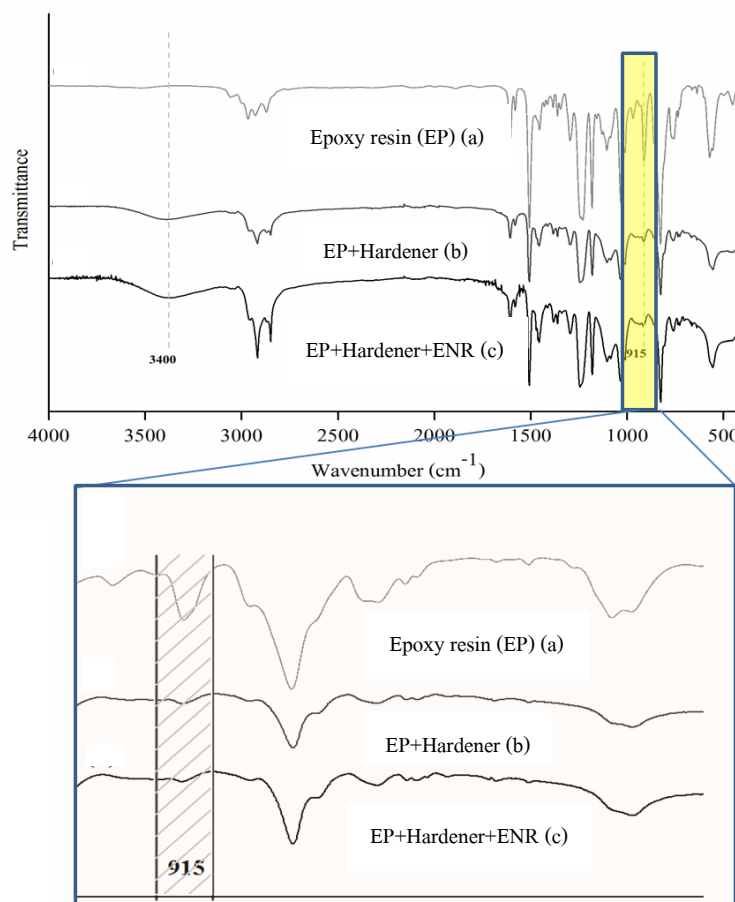
4.2 โครงสร้างทางเคมีและปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป

โครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซีเรซินผสมกับยาง ENR 50 และสารคงรูป สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินและ ENR 50 มีโครงสร้างวงแหวนออกซิเรนที่คล้ายกันจึงสามารถผสมเข้ากันได้ดี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถยืนยันผลโดยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.3 และสามารถคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของเส้นสเปกตรัม FTIR ตารางที่ 4.3 พบว่าสารคงรูปที่เติมไปในการผสมเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกับวงออกซิเรนในอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 ส่งผลให้วงออกซิเรนเกิดการแตกออกและเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดเจนของสารคงรูปทำให้วงออกซิเรนลดลง แต่ปรากฏมีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของอีพ็อกซีเรซินกับสารคงรูป

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ใต้กราฟ FTIR ของวงออกซิเรน หมู่ไฮดรอกซิลและอัตราส่วนความเข้มพีค

Formulation	Oxiran ring		Hydroxyl		Oxiran ring	Hydroxyl
	Position [cm ⁻¹]	Peak area	Position [cm ⁻¹]	Peak area	Indensity ratio	
Epoxy resin	915	544.50	-	-	1.60	-
Epoxy resin/ Hardener	915	5.91	3400	703.27	1.21	1.33
Epoxy resin/ ENR50/ Hardener	915	7.23	3400	1150.2	1.37	1.60

ผลจากตารางที่ 4.3 ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณพื้นที่ใต้พีคของวงออกซิเรนในโครงสร้างอีพ็อกซีเรซินมีแนวโน้มสูง แต่เมื่อผสมกับสารคงรูปพบว่าวงออกซิเรนมีพื้นที่ใต้กราฟลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับการคงรูป แต่หลังจากเติมยาง ENR 50 ลงในกระบวนการผสมพบว่าวงออกซิเรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีวงออกซิเรนที่เพิ่มขึ้นจากยาง ENR 50 ที่เติมลงไป สอดคล้องกับตำแหน่งแถบการสั่นของวงออกซิเรนที่เห็นได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน (a) อีพ็อกซีเรซิน (b) อีพ็อกซีเรซิน/สารคงรูป (c) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป

รูปที่ 4.3 พบว่าอีพ็อกซีเรซินที่ใช้งานจะปรากฏแถบการสั่นยืดของวงออกซิเรน (C-O และ C-O-C) ที่ 915 และ 830 cm^{-1} ตามลำดับซึ่งเป็นแถบการสั่นเฉพาะที่จะเกิดปฏิกิริยากับสารคงรูป ดังรูปที่ 4.3 (a) ส่วนอีพ็อกซีเรซินผสมสารคงรูปและอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป ดังรูปที่ 4.3 (b) และ (c) พบว่าความเข้มพีคของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3400 cm^{-1} เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินและพีคของวงออกซิเรนที่ตำแหน่ง 915 cm^{-1} มีความเข้มของพีค

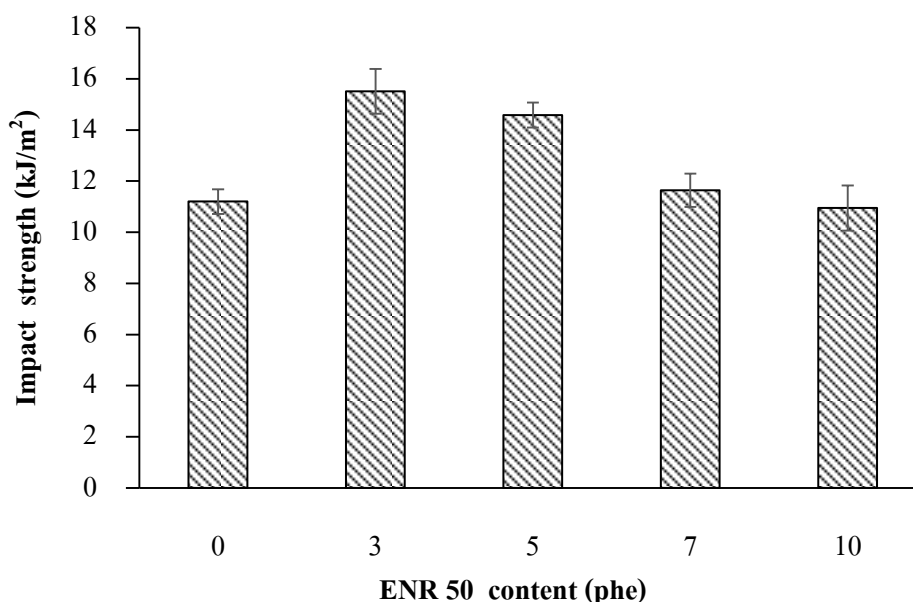
ลดลง (Xu *et al.*, 2013) เทียบความเข้มฟลักของวงออกซิเรนในอีพ็อกซีเรซิน หลังจากเติมยาง ENR 50 มีความเข้มของฟลักเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีการผสมอีพ็อกซีเรซินกับสารคงรูป มีวงออกซิเรนเพิ่มขึ้นจากการเติมยาง ENR 50 สอดคล้องกับพื้นที่ได้ฟลักและความเข้มฟลักของวงออกซิเรน (ตารางที่ 4.3)

4.3 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่มีการแปรปริมาณยาง ENR 50 อัตราส่วน 0, 3, 5, 7 และ 10 phr และผสมกับสารคงรูปตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการคงรูปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อุณหภูมิห้อง มีค่าความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็ง แสดงดังนี้

4.3.1 ความทนแรงกระแทกของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

ผลการทดสอบค่าความทนแรงกระแทกรายงานเป็นพลังงานการดูดกลืนต่อหน่วยของพื้นที่หน้าตัดหลังรอยบากตามมาตรฐาน ASTM D 256 แบบ Izod แสดงดังรูปที่ 4.4



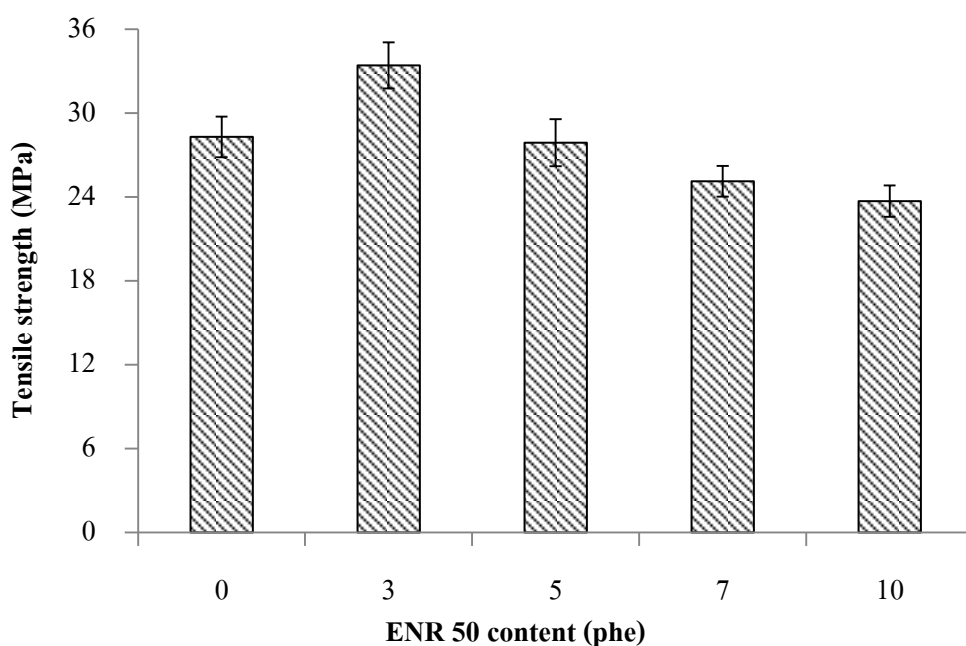
รูปที่ 4.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของคอมโพลีอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

จากรูปที่ 4.4 พบว่าอีพ็อกซีเรซินมีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินผสมที่ยาง ENR 50 ที่อัตราส่วน 3 และ 5 phr เนื่องจากยาง ENR 50 ทำหน้าที่เป็น

ส่วนช่วยในการรับแรงและกระจายแรงในเมทริกซ์อีพ็อกซีเรซิน นอกจากนี้อนุภาคยางที่แทรกในเมทริกซ์อีพ็อกซีเรซินอาจมีส่วนเพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียว ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น (Kumar et al., 2008) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR 50 มากกว่า 7 phe ได้พบว่าความต้านทานต่อการกระแทกลดลง เนื่องจากอนุภาคยางเกิดการรวมตัวมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น กลายเป็นจุดอ่อนแอ จะส่งผลให้สมบัติความทนแรงกระแทกลดลง (Tan et al., 2013)

4.3.2 ความต้านทานต่อแรงดึงของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

จากการศึกษาสมบัติต้านทานแรงดึง โดยนำชิ้นตัวอย่างที่เป็นอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ในอัตราส่วน 3, 5, 7, และ 10 phe โดยทำการทดสอบจำนวน 6 ชิ้นต่อหนึ่งสูตรการผสม ผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.5



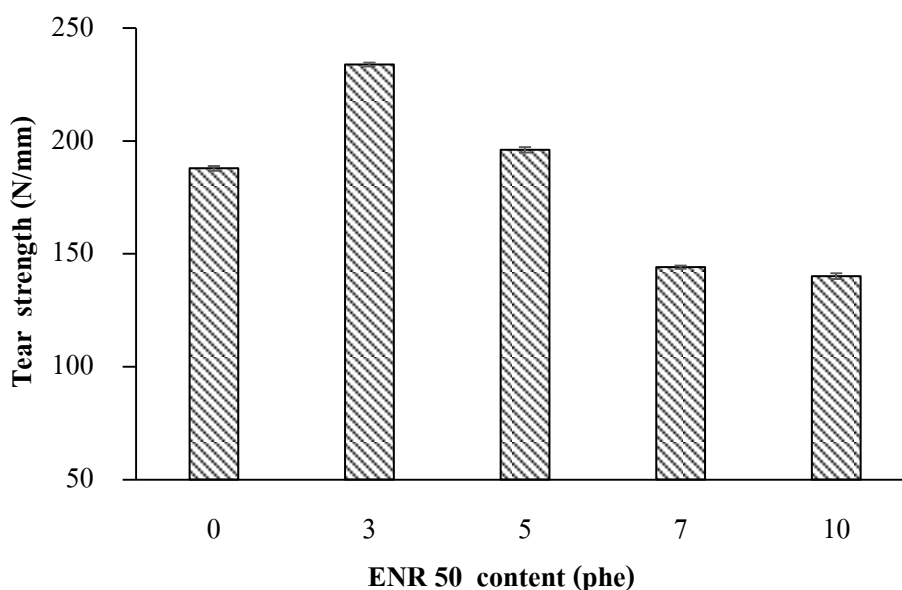
รูปที่ 4.5 ความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่อัตราส่วน 3 phe มีค่าสูงที่สุดเทียบกับอีพ็อกซีเรซินเนื่องจากอนุภาคยางมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยางเป็นปริมาณ 5, 7 และ 10 phe ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งผล

ที่ได้สอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากโมเลกุลยางเกิดการรวมตัวอนุภาคใหญ่เป็นจุดอ่อนแอส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดิ่งลดลง (Pithaksareetham, 2017)

4.3.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของอีพอกซีเรซินผสมยาง ENR 50

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิต เป็นศึกษาความแข็งแรงของวัสดุ จากการทดสอบชิ้นงานเมื่อทำการแปรปริมาณยาง ENR 50 ในอัตราส่วน 3, 5, 7, และ 10 phr ผสมกับอีพอกซีเรซินและสารคงรูปเปรียบเทียบกับอีพอกซีเรซินที่ไม่ผสมยาง แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิต ดังรูปที่ 4.6



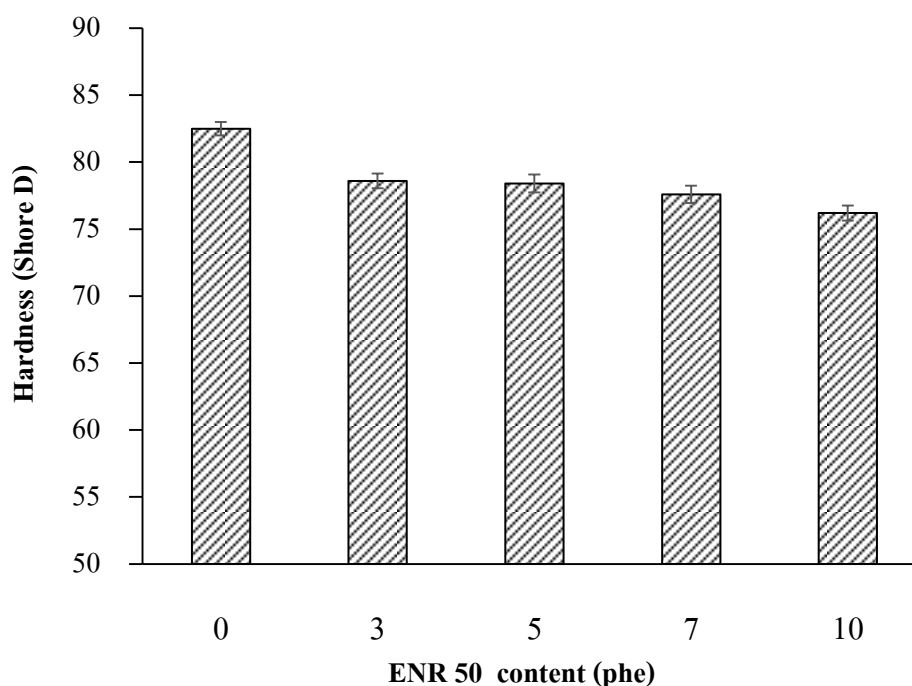
รูปที่ 4.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินผสมยาง ENR 50

จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดิ่ง คืออีพอกซีเรซินที่เติมยาง ENR 50 ในปริมาณ 3 phr ให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการฉีกขาดของอีพอกซีเรซิน ซึ่งอาจเป็นผลจากการกระจายตัวที่ดีในอัตราส่วน 3 phr ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางกับอีพอกซีเรซินสูงเพราะขนาดอนุภาคยางเล็กทำให้เมทริกซ์ของอีพอกซีเรซินมีความยึดหยุ่นมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณยาง ENR 50 มากกว่า 3 phr

พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เพราะยางรวมตัวกันเองทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางกับเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซินลดลงทำให้ฉีกขาดได้ง่าย (Pithaksareetham, 2017) สอดคล้องกับผลของ SEM ดังรูปที่ 4.9

4.3.4 ความแข็งของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบได้จากการนำตัวอย่างมาทำการกดด้วยเครื่องหัวเข็มแบบ Shore D จากเครื่องวัดความแข็ง ซึ่งทำการกดซ้ำสามครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง เพื่อให้เป็นตัวแทนของแต่ละตัวอย่างโดยค่าที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความแข็งของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่าความแข็งเริ่มต้นของอีพ็อกซีเรซินมีค่าสูงที่สุดประมาณ 83 shore D แต่เมื่อผสมยาง ENR 50 ลงในเฟสของอีพ็อกซีเรซินที่อัตราส่วน 3, 5, 7 และ 10 phr พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยาง ENR 50 ที่เพิ่มขึ้น (Pithaksareetham, 2017) เนื่องจากภายในโครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินประกอบด้วยหมู่อะโรมาติก จึงส่งผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อมีการผสมยาง ENR 50 ที่มีความยืดหยุ่นลงในเมทริกซ์

ของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินลดลง เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะอยู่ในช่วง 4.86 - 8.9%

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

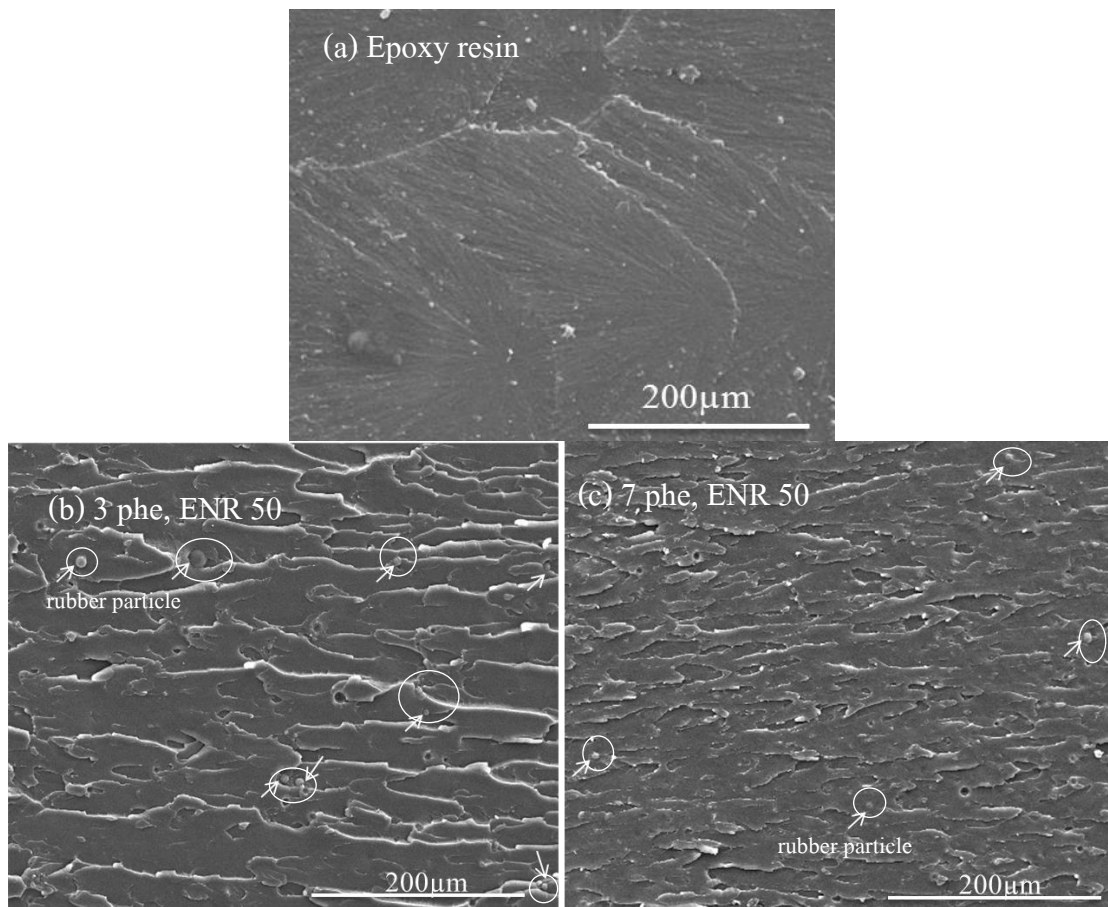
ENR 50 (phe)	Tensile strength (MPa)	Hardness (Shore D)	Tear strength (N/mm)	Impact strength (kJ/m ²)
0	28.78±1.46 ^c	82.50±0.50 ^a	187.89±1.09 ^c	11.20±0.48 ^d
3	33.41±1.65 ^a	78.60±0.54 ^b	230.90±0.89 ^a	15.51±0.88 ^a
5	27.88±1.69 ^b	77.70±0.67 ^b	196.10±1.21 ^b	14.38±0.49 ^b
7	25.12±1.10 ^b	77.60±0.65 ^b	144.13±0.66 ^c	12.64±0.65 ^c
10	23.70±1.12 ^d	76.20±0.57 ^c	140.11±1.28 ^d	10.95±0.88 ^d

^{a,b,c,d,e} 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.

จากตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราส่วนของยาง ENR 50 ที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดเมื่อผสมกับอีพ็อกซีเรซิน คือ อัตราส่วน 3 phe จึงได้ทำการเลือกอัตราส่วนนี้มาศึกษาต่อใน Past ที่ 2 คือ ผสมนาโนซิลิกาลงในคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล

4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซินที่เติมยาง ENR 50 ที่เพิ่มขึ้นสามารถยืนยันผลที่ได้ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยา จะถูกวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงผลดังในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคยางกับอีพ็อกซีเรซินเมทริกซ์

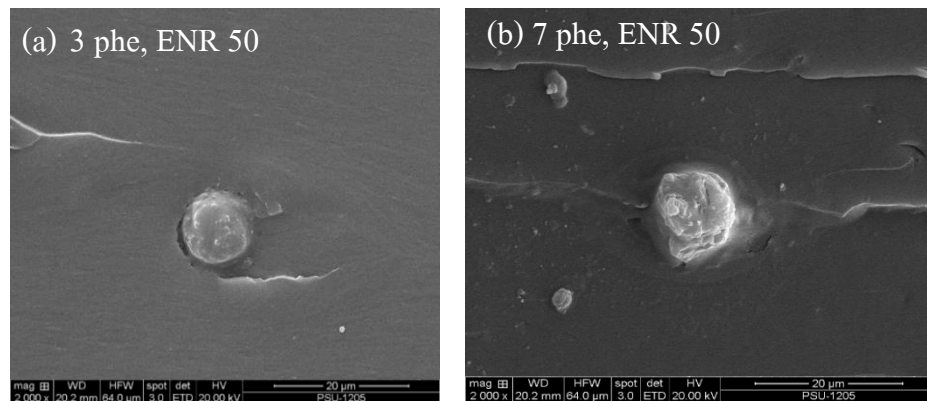


รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่ปริมาณแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 อีพ็อกซีเรซินแสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของอีพ็อกซีเรซินที่มีการผสมยาง ENR 50 ที่อัตราส่วน 3 และ 7 phr นอกจากนี้ที่อัตราส่วน 3 phr ของยาง ENR 50 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของยาง ENR 50 ที่มีความสม่ำเสมอกว่าที่ยาง ENR 50 ที่ 7 phr ทั้งนี้ที่อัตราส่วน 7 phr มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบซึ่งแสดงถึงความเปราะและเมื่อได้รับแรงกระแทกส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกต่ำ (Ratna, 2001)

เมื่อดูขนาดอนุภาคของยาง ENR 50 ในเมทริกซ์อีพ็อกซีเรซินจากรูปที่ 4.9 พบว่าที่ปริมาณยาง 3 phr ขนาดอนุภาคจะมีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้ในเมทริกซ์สามารถเกิดการกระจายพลังงานได้ดีกว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ปริมาณ 3 phr จึงมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่นๆ แต่ที่ปริมาณยาง 7 phr พบว่าขนาดอนุภาคของยางมีขนาดใหญ่ขึ้นที่กำลังขยายเท่ากัน

เพราะยางเกิดการรวมกันทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลงและกลายเป็นจุดอ่อนแอส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง (Jin, 2007)

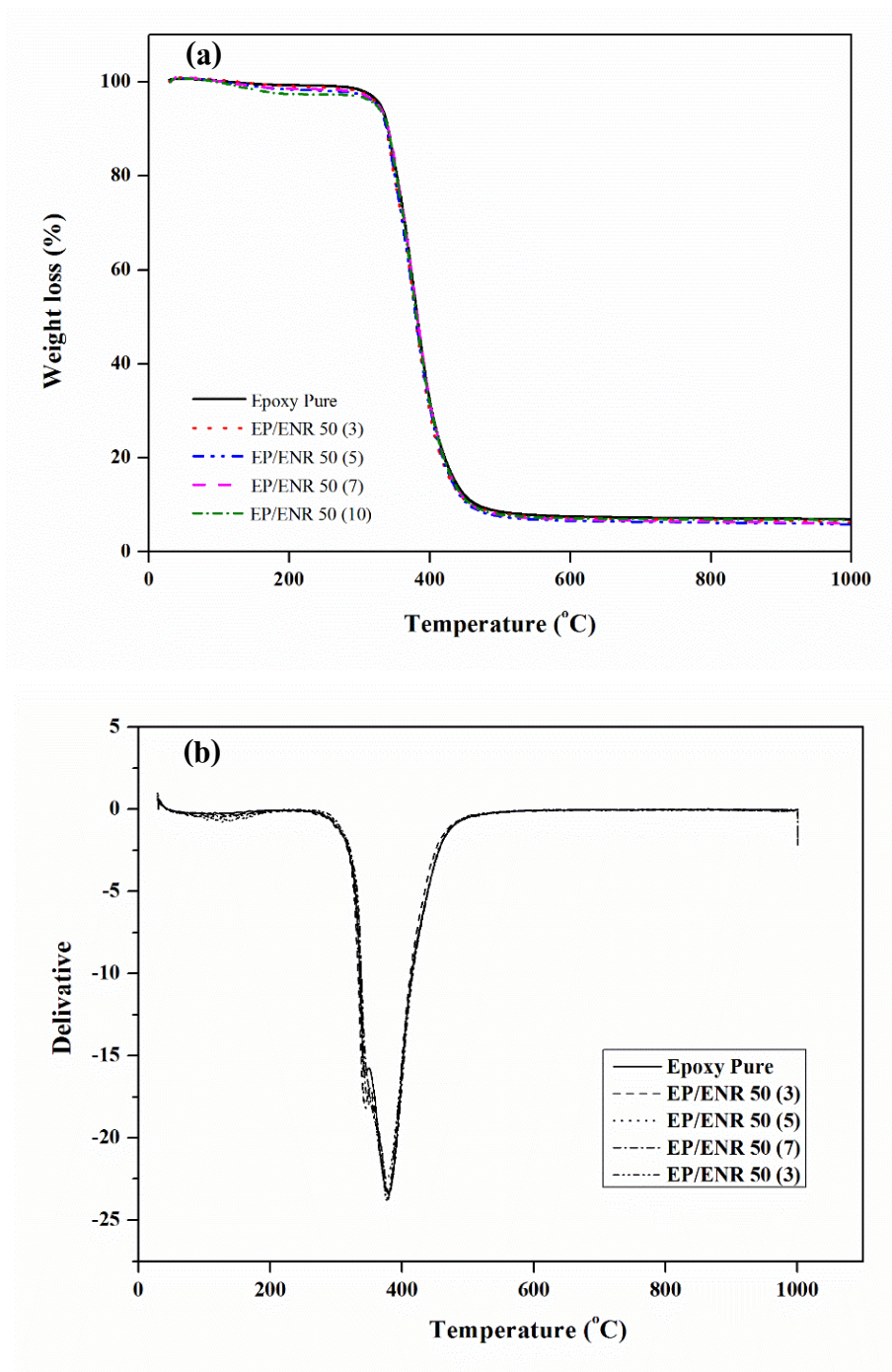


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของยาง ENR 50 ที่ใส่ในคอมโพสิตโดยมีการแปรปริมาณ (a) 3 phr, ENR 50 และ (b) ผสม 7 phr, ENR 50

4.5 สมบัติทางความร้อนของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

4.5.1 การทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ทดสอบสมบัติความเสถียรต่อความร้อนของอีพ็อกซีเรซินที่ทำการปรับปรุงสมบัติจากการผสมยาง ENR 50 ที่อัตราส่วน 0, 3, 5, 7 และ 10 phr โดยเครื่อง TGA (Thermogravimetric analysis) ภายใต้สภาวะไนโตรเจน โดยให้ความร้อน 30°C - $1,000^{\circ}\text{C}$ ด้วยการควบคุมอัตราการให้ความร้อน 20°C ต่อนาที ค่าความเสถียรต่อความร้อนของอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิตที่เติมยาง ENR แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟ TGA (a) และ DTA (b) ของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่ปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

ENR 50 (phr)	Onset thermal decomposition	T_d
0	329.13	365.44
3	329.51	374.16
5	330.12	373.35
7	333.82	375.24
10	333.86	374.51

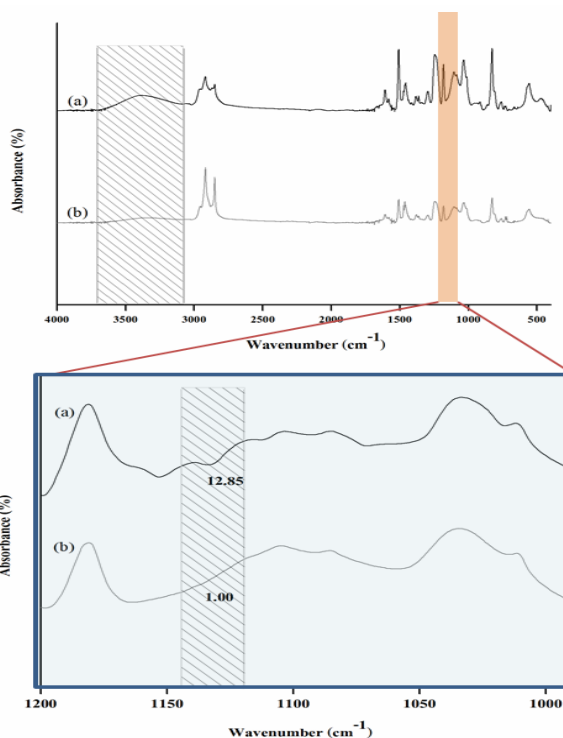
หมายเหตุ: T_d อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation)

ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค TGA แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าอีพ็อกซีเรซินมีการสลายตัวในขั้นเดียว (One-step decomposition) โดยมีสลายตัวอุณหภูมิ 100 °C อาจจะเป็นโมเลกุลของน้ำในช่วงแรก และอุณหภูมิการเสื่อมสลายเริ่มต้นที่ประมาณ 329 °C ซึ่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเสื่อมสลายเริ่มต้นอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่อัตราส่วน 3, 5, 7 และ 10 phr มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 329 °C, 330 °C, 333 °C และ 333 °C ตามลำดับ แต่เมื่อสังเกตจากค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนจากกราฟ DTA และ T_d ในตารางที่ 4.5 อีพ็อกซีเรซินมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่อัตราส่วนต่างๆ อาจเป็นไปได้ว่ามีวงแหวนออกซิเรินที่เพิ่มขึ้นจากการผสมยาง ENR 50 จะส่งผลให้ต้องใช้พลังงานหรือความร้อนมากขึ้นในการสลายตัวทำลายแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวได้

Part III: ปรับปรุงสมบัติของอิพ็อกซีเรซินด้วยยาง ENR 50 ผสมนาโนซิลิกา

4.1 โครงสร้างทางเคมีของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ผสมนาโนซิลิกาและสารคงรูป

เมื่อได้อัตราส่วนของยาง ENR 50 จึงนำอัตราส่วนดังกล่าวมาผสมกับนาโนซิลิกา และทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล เพื่อหาอัตราส่วนกับสูตรที่เหมาะสมแก่การขึ้นรูปไบพัด โครน ทั้งนี้ นาโนซิลิกามีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับอิพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 จึงมีโอกาสที่ผสมเข้ากันได้ดี โดยเกิดปฏิกิริยาของการผสมแสดงดังรูปที่ 4.11 และเพื่อยืนยันผลการทำปฏิกิริยาโดยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของเส้นสเปกตรัม FTIR ดังตารางที่ 4.6 การผสมอิพ็อกซีเรซินกับยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา ทำการกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นตอนการผสมดังกล่าว พบว่านาโนซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่บนพื้นผิวในขณะที่ยาง ENR 50 และอิพ็อกซีเรซินมีวงออกซิเรน เมื่อให้แรงในการคนอาจส่งผลทำให้วงออกซิเรนเกิดการแตกตัวได้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเกิดอัตริกิริยากับนาโนซิลิกาได้โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ได้จากการแตกตัวจากวงออกซิเรนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของนาโนซิลิกาเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการแตกตัวของยาง ENR 50 และอิพ็อกซีเรซินกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของนาโนซิลิกา



รูปที่ 4.11 เส้นสเปกตรัม FTIR ของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 นาโนซิลิกาและสารคงรูป
เปรียบเทียบกับอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และสารคงรูป

นอกจากนี้อีพ็อกซีเรซินที่ผสมยาง ENR 50 นาโนซิลิกาและสารคงรูป สามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างกันได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่ได้จากการแตกตัวของวงออกซิเรนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของนาโนซิลิกา โดยเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ได้พันธะเชื่อมโยงใหม่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์กับนาโนซิลิกาเกิดพันธะใหม่คือ Si-O-C

จากรูปที่ 4.11 ผลของการทดลองพบว่าการเติมนาโนซิลิกามีผลให้ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3340 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมาจากหมู่ไฮดรอกซิลที่จากบนพื้นผิวของนาโนซิลิกา ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ใต้พีคและปริมาณความเข้มพีคของหมู่ดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.6 จะมีพื้นที่ใต้พีคของหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าที่ไม่เติมนาโนซิลิกาในขณะที่พันธะ Si-O-C ที่ปรากฏขึ้นใหม่ในช่วงคลื่น 1130 cm^{-1} มีความสอดคล้องกับค่าความเข้มของพีคและพื้นที่ใต้พีคที่มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 แต่ตัวอย่างอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 จะไม่ปรากฏพีคดังกล่าว

ตารางที่ 4.6 จุดกึ่งกลางแถบการสั่นของหมู่ออกซิเรนกับไฮดรอกซิลและเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใต้กราฟ

Formulation	Oxiran ring			Hydroxyl		
	Position [cm^{-1}]	Peak area	Indensity ratio	position [cm^{-1}]	Peak area	Indensity ratio
ENR 50	875	143	1.05	3400	147.08	0.97
ENR 50 / Nanosilica	875	127	0.78	3400	651.85	1.67
Epoxy resin/ENR 50	915	530	0.57	3400	380.20	0.005
Epoxy resin /ENR 50 / Nanosilica	915	430	0.22	3400	1,530.52	0.082
Epoxy resin /ENR 50 / Nanosilica /Hardener	915	41	0.0049	3400	1,850.30	1.106

จากข้อมูลดังตารางที่ 4.6 สามารถสรุปได้ว่าการผสมยาง ENR 50 กับนาโนซิลิกาเมื่อมีการใช้แรงในการกวนจะทำให้วงออกซิเรนเกิดการเปิดวงออกเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเข้มพีคและพื้นที่ใต้พีคเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มพีคและพื้นที่ใต้พีคเพิ่มขึ้นของวงออกซิเรนลดลงเนื่องจากการเติมนาโนซิลิกาจะช่วยเพิ่มความหนืดขึ้นในระบบมีความหนืดย่นำให้วงออกซิเรนเกิดการแตกตัวได้มากยิ่งขึ้นและมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ซึ่งเมื่อมีการเติมนาโนซิลิกาส่งผลให้วงออกซิเรนลดลงเช่นกัน แต่จะมีพีคของหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น

4.2 ลักษณะทางกายภาพของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 นาโนซิลิกา และสารคงรูป

ลักษณะทางกายภาพของอิพ็อกซีเรซินที่ได้รับการผสมยาง ENR 50 และสารคงรูปที่อัตราส่วน 100:3:35 เพื่อคุณลักษณะเบื้องต้นของสาร ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 นาโนซิลิกาและสารคงรูปต่อระยะเวลาการผสม



จากผลในตารางที่ 4.7 พบว่าลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้เมื่อเริ่มต้นทำการผสมอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา ดังรูป (a) พบว่าเกิดการแยกเฟสอย่างชัดเจนเมื่อทำจากกวนเป็นเวลา 15 นาที ดังรูป (b) สารแต่ละตัวมีความเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นขาวนวลมีความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการกวน แต่หลังจากผสมสารคงรูป ดังรูป (c) พบว่าสารมีลักษณะเป็นสีเหลืองมีความหนืดและความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อทำการกวน ซึ่งเร็วกว่าอิพ็อกซีเรซินผสมยางและสารคงรูป มีความเป็นไปได้ว่านาโนซิลิกาที่เติมมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารคงรูปเกิดซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูปในกระบวนการผลิตไบพัดอากาศยานไร้คนขับ

4.3 ความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิต

ความหนาแน่นของอิพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 ที่มีการเติมสารนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 4.8

จากตารางที่ 4.8 พบว่าความหนาแน่นของอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นที่ผสมนาโนซิลิกาที่อัตราส่วน 1, 2, 3, 4 และ 5 phc ตามลำดับ ซึ่งมีผลดีต่อกระบวนการขึ้นรูปไบพัดอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกับอิพ็อกซีเรซิน

ตารางที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นของนาโนคอมโพสิตที่แปรปริมาณนาโนซิลิกา

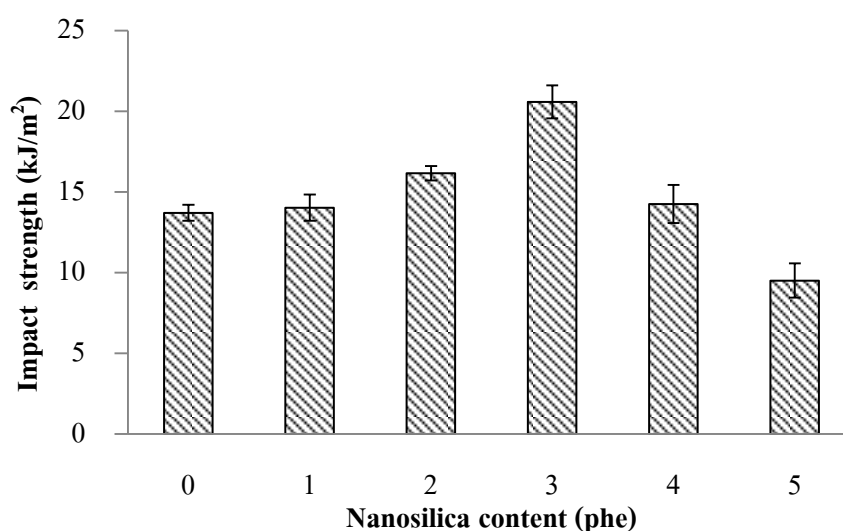
ปริมาณนาโนซิลิกา (phe)	Density (g/cm ³)
0	0.97 ± 0.01
1	0.98 ± 0.02
2	0.99 ± 0.01
3	1.00 ± 0.02
4	1.02 ± 0.02
5	1.04 ± 0.01

4.4 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต

นาโนคอมโพสิตได้จากการผสมอีพ็อกซีเรซินกับยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา โดยมีปริมาณนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 phe เพื่อเปรียบเทียบกับอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และได้อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปเป็นไบพัด โครน

4.4.1 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ความต้านทานต่อแรงกระแทกเป็นการทดสอบแบบ Izod โดยตัวอย่างจะมีรอยบากที่ถูกสร้างขึ้นอย่างชัดเจนตามมาตรฐาน ASTM D256 ผลที่ได้แสดงดังรูป 4.12

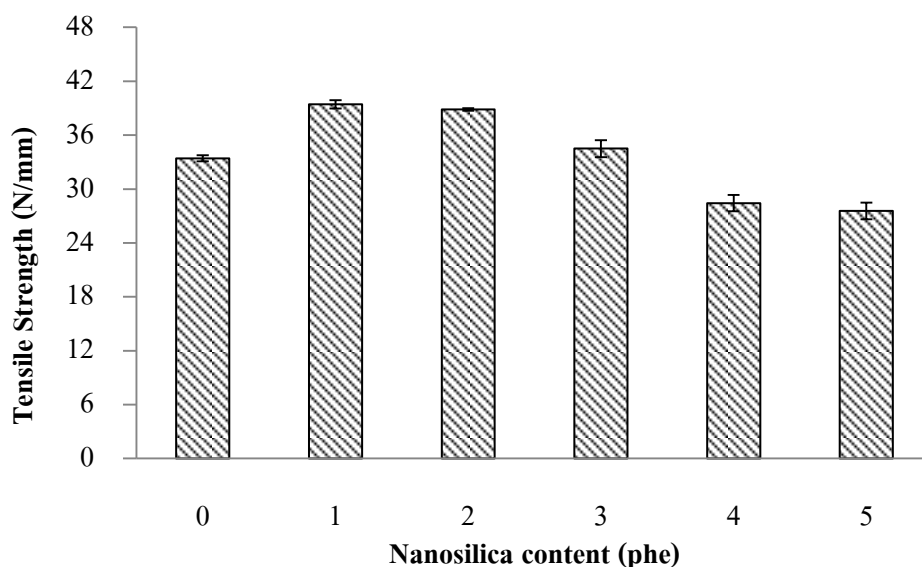


รูปที่ 4.12 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 พบว่าอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาที่ 3 phe ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุด เนื่องนาโนซิลิกาสามารถเกิดอันตรกิริยากับยาง ENR 50 ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้นและสารนาโนซิลิกาสามารถเกิดปฏิกิริยากับอีพ็อกซีเรซินได้ และพบว่านาโนซิลิกาที่อัตราส่วน 3 phe มีการกระจายตัวที่ดี จึงส่งผลให้เมื่อได้รับแรงกระแทกตัวนาโนซิลิกาและยางจะทำหน้าที่ในการเบี่ยงเบนแรงที่มากระทำส่งผลให้มีค่าความเค้นครากดีขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก แต่เมื่อเพิ่มนาโนซิลิกามากกว่า 3 phe พบว่านาโนซิลิกาจะไปเกาะกลุ่มกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระแทกทำให้แตกหักได้ง่าย สอดคล้องกับ Brunner *et al.*, (2006) และผลด้วย SEM

4.4.2 ความต้านทานต่อแรงดึง

โดยนำชิ้นตัวอย่างนาโนคอมโพสิตของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาในอัตราส่วน 1, 2, 3, 4 และ 5 phe ทำการทดสอบจำนวน 6 ซ้ำต่อหนึ่งสูตรการผสม ซึ่งผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.13



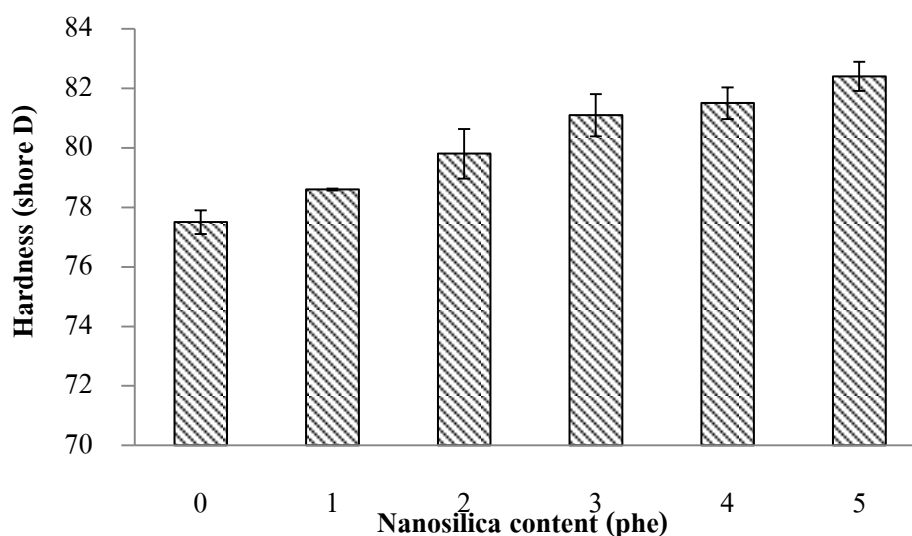
รูปที่ 4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 เนื่อง

นาโนซิลิกาเข้าไปเสริมแรงให้กับยางและนาโนซิลิกามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซินทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวสูง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงรับตัวสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกามากกว่า 3 phe ความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เพราะเฟสยางมีความหนืดเพิ่มขึ้นในส่วนผสมของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้นาโนซิลิกาเข้าไปขัดขวางการตกลึกของอีพ็อกซีเรซินและ โมเลกุลของยางทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นมีค่าลดลง (Pithaksareetham *et al.*, 2018) สอดคล้องกับสัณฐานวิทยา ดังรูปที่ 4.17

4.4.3 ความแข็ง

ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบได้จากการนำตัวอย่างมาทำการกดด้วยหัวเข็มแบบ Shore D จากเครื่องวัดความแข็ง ซึ่งทำการกดซ้ำสามครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง เพื่อให้เป็นตัวแทนของแต่ละตัวอย่างโดยค่าที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14

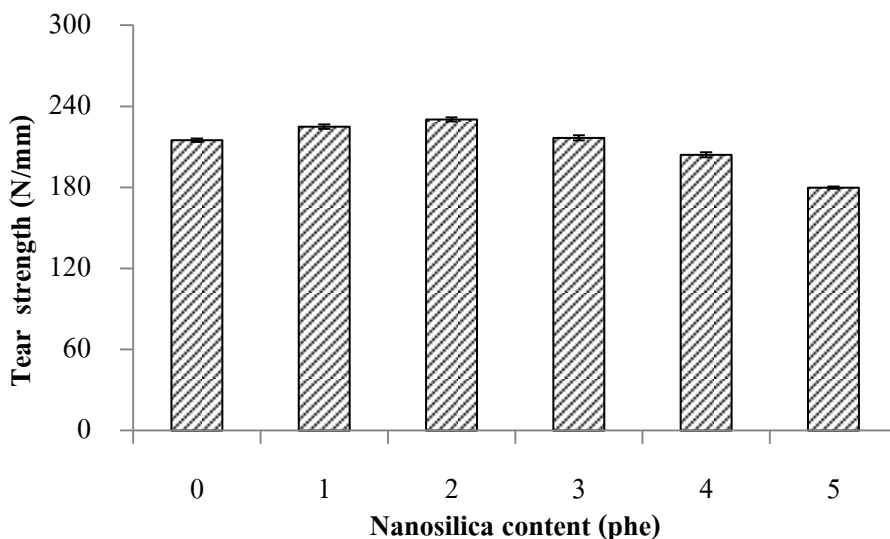


รูปที่ 4.14 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่าอีพ็อกซีเรซินที่มีการเติมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกามีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกาเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 เนื่องจากนาโนซิลิกาเป็นสารเสริมแรงเมื่อเติมลงในคอมโพสิตส่งผลให้พื้นผิวมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน

4.4.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ความต้านทานต่อการฉีกขาด เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุจากการเตรียมชิ้นงานทดสอบจากคอมโพสิตที่ฟ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาที่อัตราส่วน 1-5 phe ตามมาตรฐาน ASTM 264 ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความต้านทานการฉีกขาดของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความต้านทานการฉีกขาดของอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกามีแนวโน้มคล้ายคลึงกับสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึง คือเมื่อมีการเติมนาโนซิลิกาในคอมโพสิตนาโนซิลิกาจะทำหน้าที่เป็นส่วนเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงให้กับอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 จึงส่งผลให้สมบัติดีขึ้น แต่เมื่อมีปริมาณมากกว่า 3 phe ส่งผลให้สมบัติตกลงลดลง มีความเป็นไปได้ว่านาโนซิลิกาเข้าไปขัดขวางการตกผลึกของยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกันส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของยาง ENR 50 และอีพ็อกซีเรซินลดลงจึงทำให้สมบัติตก

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อมีการแปรปริมาณของนาโนซิลิกาในช่วง 1-3 phr ผสมกับอีพ็อกซีเรซินและยาง ENR 50 มีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นสมบัติด้านความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการกระแทก แต่สมบัติด้านความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้สมบัติที่ให้ความสนใจมากที่สุดต่อการปรับปรุงอีพ็อกซีเรซิน คือความต้านทานต่อแรงกระแทก เนื่องเป็นสมบัติที่ทางใบพัดต้องการและพบว่านาโนคอมโพสิตที่ 3 phr จะให้ค่าสูงถึง 45 % เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50

ตารางที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิต

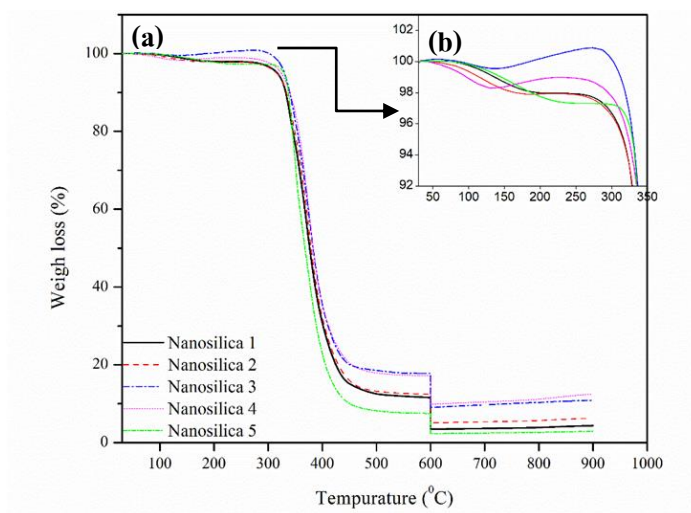
Nanosilica (phr)	Tensile Strength (MPa)	Tear Strength (N/mm)	Hardness (Shore D)	Impact Strength (kJ/m ²)
0	33.41 ± 0.3 ^c	215.90 ± 0.89 ^a	78.50 ± 0.54 ^b	13.45 ± 0.88 ^b
1	39.43 ± 0.47 ^a	225.00 ± 1.68 ^b	78.60 ± 0.03 ^b	13.02 ± 0.82 ^e
2	38.85 ± 0.14 ^b	230.33 ± 1.57 ^c	79.80 ± 0.83 ^a	15.16 ± 0.45 ^d
3	33.50 ± 0.94 ^c	216.67 ± 1.86 ^a	80.10 ± 0.71 ^a	20.58 ± 1.03 ^a
4	28.43 ± 0.92 ^d	204.15 ± 1.8d ^e	82.00 ± 0.53 ^a	13.25 ± 1.18 ^c
5	27.57 ± 0.92 ^e	179.85 ± 0.80 ^f	82.40 ± 0.49 ^a	9.50 ± 1.06 ^e

^{a, b, c, d, e, f} Different superscripts indicate statistically significant differences at 95% confidence by

Duncan's method. Mean ± SD: mean and standard deviation based on triplicate samples

4.5 สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิต

สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาแตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 30-900 °C



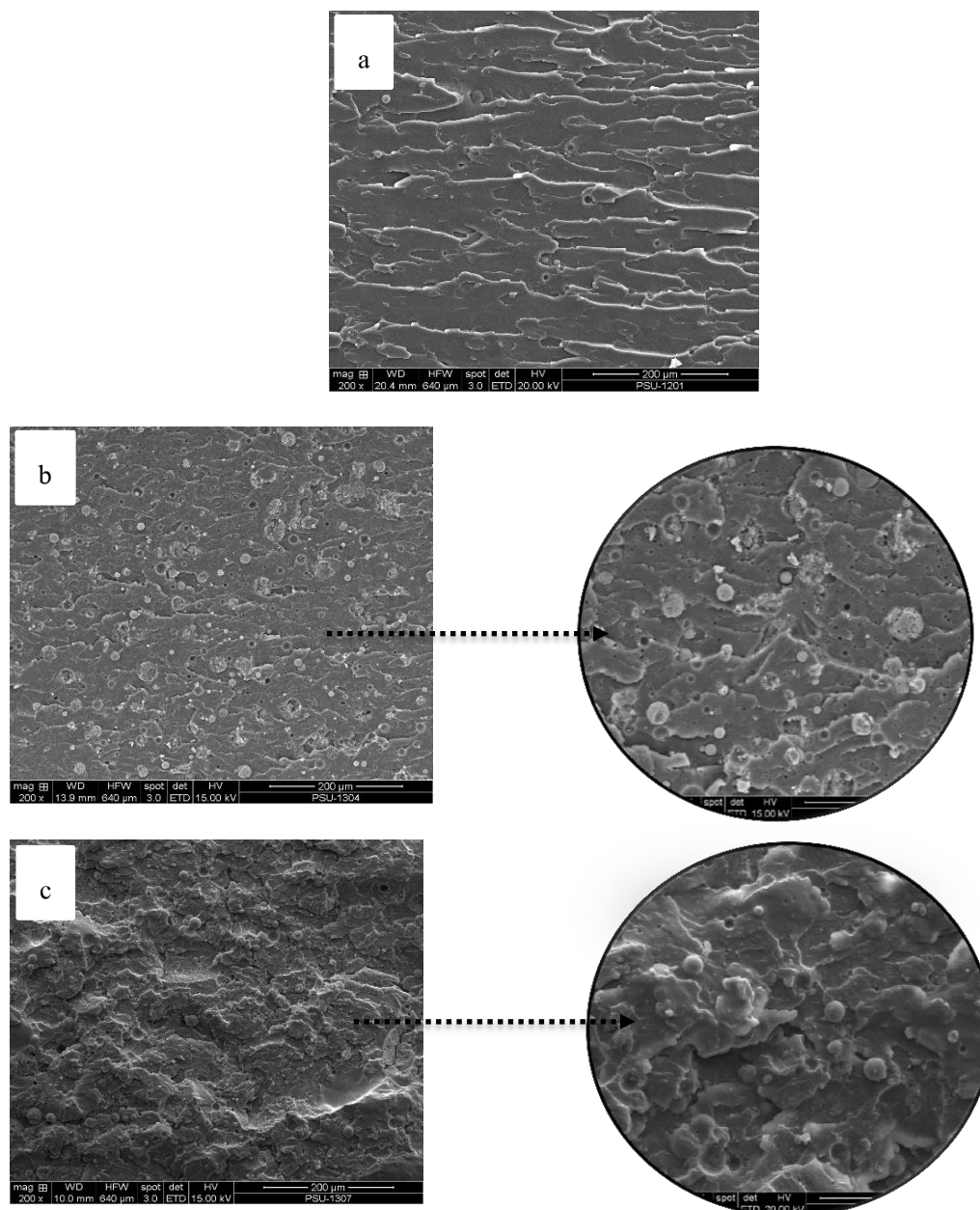
รูปที่ 4.16 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณ

นาโนซิลิกาต่างกันเทียบกับอุณหภูมิ (b) กราฟขยายอุณหภูมิการเสื่อมสลายช่วงแรกของนาโนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.16 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตที่มีการปริมาณนาโนซิลิกาที่ต่างกัน พบว่านาโนคอมโพสิตเกิดการสลายตัวแบบ 3 ชั้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าการสลายตัวในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C จะเป็นการสลายตัวของน้ำที่หลงเหลืออยู่นอกจากนี้ยังพบพฤติกรรมการสลายตัวที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่ประมาณ 370 °C โดยการสลายตัวข้างต้นนี้เป็นการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซิน เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินมีอุณหภูมิการเสื่อมอยู่ที่ประมาณ 330-380 °C (Grassie *et al.*, 1985) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตที่อุณหภูมิที่ 80 % ของการสลายตัว พบว่าการแปรปริมาณสารตัวเติมทำให้คอมโพสิตมีความต้านทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณนาโนซิลิกา 3 phr จะแสดงค่าความเสถียรต่อความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่นๆ ดังรูปที่ 4.16 (b) สำหรับการสลายตัวหลังการเปลี่ยนเป็นสถานะ O₂ แสดงการสลายตัวทางความร้อนของนาโนซิลิกา

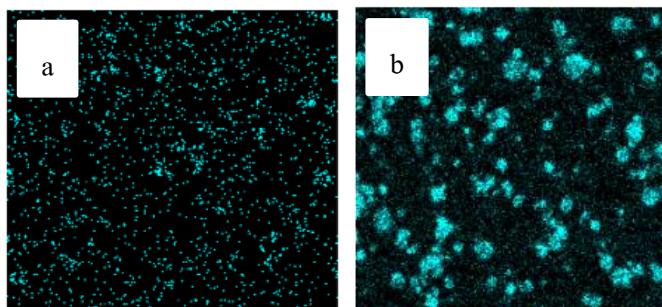
4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิต

ลักษณะสัณฐานวิทยาใช้เพื่อยืนยันสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นของอีพ็อกซีเรซินที่ผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคยางและการกระจายตัวของยาง ENR 50 และนาโนซิลิกาในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน แสดงในดั่งรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของ (a) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50, (b) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา 3 phe (c) อีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา 5 phe

จากรูปที่ 4.17 แสดงลักษณะพื้นผิวของอิพ็อกซีเรซิน 3 phe ของยาง ENR 50 สามารถสังเกตเห็นลักษณะของรอยแตก บนพื้นผิวของอิพ็อกซีเรซินที่เดิมยางและสังเกตเห็นอนุภาคของยาง ENR 50 มีลักษณะเป็นก้อนกลมแทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ของอิพ็อกซีเรซิน เมื่อเทียบกับคอมโพสิตอิพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ที่เติมนาโนซิลิกา 3 phe พบว่าพื้นผิวมีลักษณะของรอยแตกที่ลดลงและมีอนุภาคของยาง ENR 50 และนาโนซิลิกากระจายตัวบนเมทริกซ์อิพ็อกซีเรซิน แต่เมื่อเติมนาโนซิลิกา พบว่าจะมีพื้นผิวที่เป็นกลุ่มก้อนขรุขระและมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นในเมทริกซ์ของอิพ็อกซีเรซิน เมื่อเทียบกับอัตราส่วนของนาโนซิลิกา 3 phe ซึ่งเป็นผลมาจากนาโนซิลิกาเกิดการรวมตัวกันเป็นผลให้สมบัติเชิงกลเช่น ความต้านทานการฉีกและความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณนาโนซิลิกามากกว่า 3 phe สอดคล้องกับผลการกระจายตัวของนาโนซิลิกา ในเมทริกซ์ของอิพ็อกซีเรซินด้วย SEM-EDX ที่กำลังขยาย 100 ไมโครเมตรซึ่งจะแสดงเป็นธาตุของซิลิกอน ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 SEM-EDX แสดงถึงธาตุของนาโนซิลิกาในเมทริกซ์ของอิพ็อกซีเรซิน

(a) นาโนซิลิกา 3 phe (b) นาโนซิลิกา 5 phe

จากการศึกษาแปรปรมาณของนาโนซิลิกาในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าซิลิกาที่อัตราส่วน 3 phe จะให้สมบัติด้านการกระแทกสูงที่สุดอยู่ที่ 21.78 kJ/m^2 โดยเป็นสมบัติหลักที่ต้องการปรับปรุงในตัวของใบพัด UAV และเมื่อเทียบกับผลสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของ ENR 50 ผสมอิพ็อกซีเรซินจะอยู่ที่ 17.54 kJ/m^2 นอกจากนี้พบว่า การเติมนาโนซิลิกาแสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าในกรณีไม่เติมนาโนซิลิกา ดังนั้นจึงนำอัตราส่วนที่ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด คือนาโนซิลิกา 3 phe ทำการศึกษาในส่วนของการบินรูปเป็นใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

Part IV: ศึกษาการขึ้นรูปไบโพลีเมอร์จากพืชอากาศยานไร้คนขับ

4.1 ขึ้นรูปไบโพลีเมอร์จากพืชอากาศยานไร้คนขับและแปรปริมาณชั้นคาร์บอนไฟเบอร์

การขึ้นรูปไบโพลีเมอร์จากพืชอากาศยานไร้คนขับนั้นจะใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยแบบพิมพ์โลหะแบบ Infusion ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งได้ทำการศึกษาจำนวนชั้นของคาร์บอนไฟเบอร์ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั้นด้วยแบบพิมพ์โลหะและใช้อีพ็อกซีเรซินที่ได้ศึกษาเป็นตัวเชื่อมประสาน

4.1.1 จัดแบบพิมพ์เหล็กให้สะอาด ใช้แว๊กเพื่อป้องกันการติดระหว่างชั้นผ้าคาร์บอนกับแบบพิมพ์ ดังรูป (a)

4.1.2 ตัดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้ได้ขนาดเท่ากับแบบพิมพ์ของไบโพลีเมอร์ แล้วนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ตัดวางซ้อนทับกันในแบบพิมพ์ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ ดังรูป (b)

4.1.3 เปิดเครื่องแวคคัมปั๊มเพื่อดูดอีพ็อกซีเรซินเข้าไปในแบบพิมพ์ ทิ้งไว้ 10-15 นาที แล้วปิดเครื่องแวคคัมปั๊ม ดังรูป (c)

4.1.4 ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแข็งตัว ดังรูป (d)



รูปที่ 4.19 การขึ้นรูปไบโพลีเมอร์จากพืชอากาศยานไร้คนขับแบบ Infusion จากแบบพิมพ์เหล็ก

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปใบพัดด้วยแบบพิมพ์โลหะ

การขึ้นรูปด้วยวิธีการ Infusion โดยใช้แบบพิมพ์โลหะมักมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานที่ได้ขณะทำการขึ้นรูปซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหาคณะขึ้นรูปใบพัด

ปัญหา	สาเหตุ	แนวทางการแก้ไข
1. การตัดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	1. แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะหลุดร่อนเมื่อทำการตัด	1. ทำการตัดโดยใช้คัตเตอร์กรีด 2. ในขั้นตอนลงแวคคัมสามารถตัดแต่งชิ้นผ้าให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ
2. แบบพิมพ์ไม่อยู่ในรูปสูญญากาศ	1. โอริงเสื่อมสภาพ 2. ปิดแบบพิมพ์ไม่สนิท	1. ตรวจสอบโอริง ถ้าเสียหายให้เปลี่ยนทันที 2. ใช้คีนน้ำมันหรือเทปกาวอุดรอยรั่วของแบบพิมพ์
3. เกิดฟองอากาศ	1. ความเร็วในการกวนผสมอีพ็อกซีเรซิน/Hardener และระบบในการแวคคัม	1. ใช้ความเร็วในการกวนให้น้อยลง 2. หลังจากแวคคัมเปิดเครื่องตั้งไว้เพื่อให้ดูดฟองอากาศให้มากขึ้น
4. แบบแบบพิมพ์	1. แบบแบบพิมพ์มีผลต่อการไหลของอีพ็อกซีเรซินและชิ้นงานที่ได้	1. ควรออกแบบแบบพิมพ์ให้เรซินไหลได้ทั่วถึง 2. สามารถแกะชิ้นงานออกได้ง่าย

จากตารางที่ 4.10 เมื่อทำการแก้ไขปัญหาคณะขึ้นรูปตามแนวทางที่ได้กล่าวมาพบว่าชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจากแบบพิมพ์โลหะด้วยกระบวนการ Infusion มีลักษณะที่สมบูรณ์มากขึ้นจึงได้นำวิธีดังกล่าวมาขึ้นรูป โดยแปรปริมาณชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อให้เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยแบบพิมพ์ที่ได้ทำการออกแบบ ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ใบพัดอากาศยานไร้คนขับที่มีการแปรปริมาณจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
(a) 1 ชั้น (b) 2 ชั้น (c) 3 ชั้น (d) 4 ชั้นและ (e) 5 ชั้น

หมายเหตุ Epoxy resin : Hardener : ENR 50 : Nanosilica (100:35:3:3)

จากรูปที่ 4.20 พบว่าใบพัดที่ขึ้นรูปด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จำนวน 1-4 ชั้นสามารถขึ้นรูปได้ด้วยแบบพิมพ์โลหะที่ได้ทำการออกแบบในกระบวนการ Infusion แต่หลังจากเพิ่มปริมาณจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มากกว่าจำนวน 4 ชั้น ส่งผลให้อ็อกซีเรซินไหลเข้าแบบพิมพ์ได้ยากขึ้นเพราะความหนาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากอ็อกซีเรซินไหลได้ไม่ทั่วถึง จึงสรุปได้ว่าวิธีการขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการ Infusion โดยใช้แบบพิมพ์สามารถใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้เพียง 1-4 ชั้นเท่านั้น นอกจากนี้จำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อน้ำหนักของใบพัดและสมบัติของเชิงกลของชิ้นงาน ดังนั้นจึงเลือกจำนวนชั้น 4 ชั้นที่มากที่สุดมาขึ้นรูปโดยแปรปริมาณของนาโนซิลิกา เพราะมีความหนาใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ต้องการ

4.3 ชั้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับโดนแปรปริมาณของนาโนซิลิกา

จากการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จึงทำการเลือกแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จำนวน 4 ชั้น มาขึ้นรูป โดยมีการแปรปริมาณนาโนซิลิกาเพื่อและดูลักษณะทางกายภาพของใบพัดที่ได้ทำการผลิตเทียบกับลักษณะทางกายภาพของใบพัดที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน แสดงดังรูป 4.21



(a) ใบพัด UAV



(b) ใบพัด UAV ผสมนาโนซิลิกา 1 phr



(c) ใบพัด UAV ผสมนาโนซิลิกา 2 phr



(d) ใบพัด UAV ผสมนาโนซิลิกา 3 phr



(e) ใบพัด UAV ผสมนาโนซิลิกา 4 phr

รูปที่ 4.21 ลักษณะของใบพัด UAV เมื่อแปรปริมาณนาโนซิลิกา

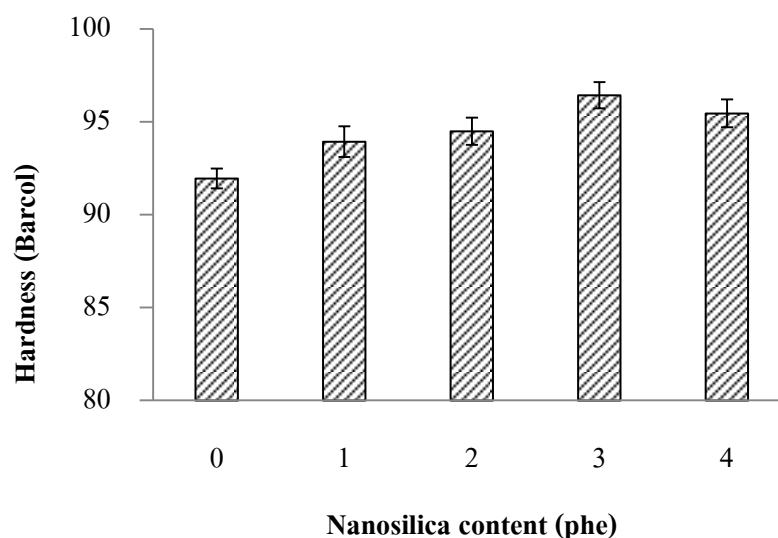
จากรูปที่ 4.21 พบว่าการเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกาลงไปในคอมโพสิต จะส่งผลต่อการขึ้นรูปของใบพัดและลักษณะสีของชิ้นงานที่ได้กล่าวคือ ที่อัตราส่วนของนาโนซิลิกา 1-3 phe สามารถขึ้นรูปใบพัดที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับใบพัดที่ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน แต่หลังจากมีการเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกาส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มในกระบวนการขึ้นรูปส่งผลต่ออัตราการไหลของอีพ็อกซีเรซินซึ่งลงขณะทำการ Vacuum ทำให้ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้เต็มแบบพิมพ์ และพบว่าที่นาโนซิลิกา 4 phe ชิ้นงานจะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างคือ มีลักษณะสีขาวขุ่นเกิดขึ้นในชิ้นงาน จึงสรุปว่าปริมาณของนาโนซิลิกาที่เติมลงไปคอมโพสิตใบพัดได้ที่ 3 phe เป็นอัตราส่วนที่มากที่สุดสำหรับขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไว้คนขับด้วยแบบพิมพ์โลหะเพราะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี จากข้อสรุปดังกล่าวจึงนำนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับคาร์บอนไฟเบอร์ไปศึกษาสมบัติเชิงกลดังหัวข้อที่ 4.4 ต่อไป

4.4 สมบัติคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบนาโนคอมโพสิต

คาร์บอนไฟเบอร์เคลือบด้วยนาโนคอมโพสิตเป็นการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ด้วยกระบวนการ Infusion ซึ่งมีแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมยาง ENR 50 และทำการแปรปริมาณของนาโนซิลิกา 1-5 phe จากนั้นตัดชิ้นทดสอบตามมาตรฐานที่ต้องการจะทดสอบด้วยเครื่อง CNC

4.4.1 ค่าความแข็ง

ความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2583 ใช้วัดความแข็งของอีพ็อกซีเรซินที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว คาร์บอนไฟเบอร์ เป็นต้น ดังนั้นเมื่อค่าความแข็งที่ได้มีมากกว่าหรือเท่ากับ 90 % ของค่าความแข็งที่ผิวผิว ดังนั้นจึงทำการกดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง ซึ่งมีหน่วยในการวัดเป็นบาร์คอลล ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22

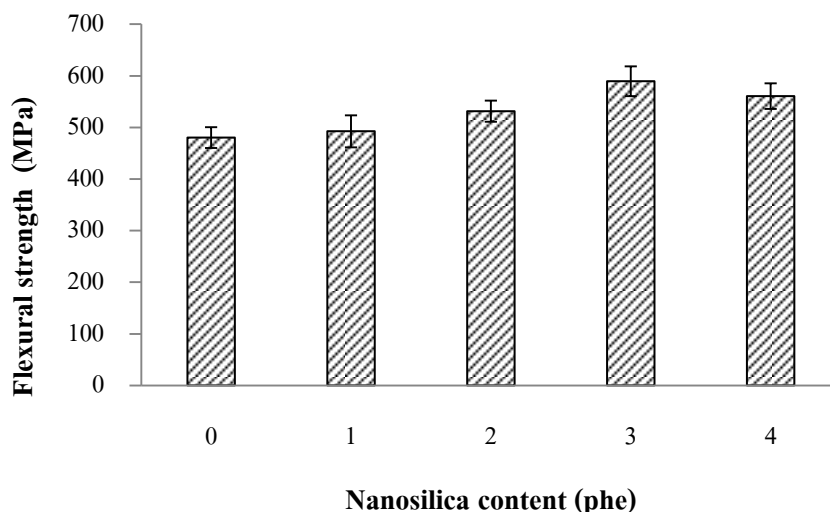


รูปที่ 4.22 ความแข็งของนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

รูปที่ 4.22 จากการปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน โดยแปรปริมาณนาโนซิลิกาเคลือบคอมโพสิตแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกา ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมนาโนซิลิกา โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วง 94-96 บาร์คอลล ทั้งนี้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมนาโนซิลิกาซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่เป็นของแข็งลงในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซินทำให้อีพ็อกซีเรซินมีความแข็งเพิ่มขึ้นและเมื่อขึ้นรูปกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ใบพัดมีการเสียรูปทรงได้ยากยิ่งขึ้น

4.4.2 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง

การทดสอบความต้านแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยใช้หน่วยเป็น MPa ซึ่งแสดงผลดังนี้

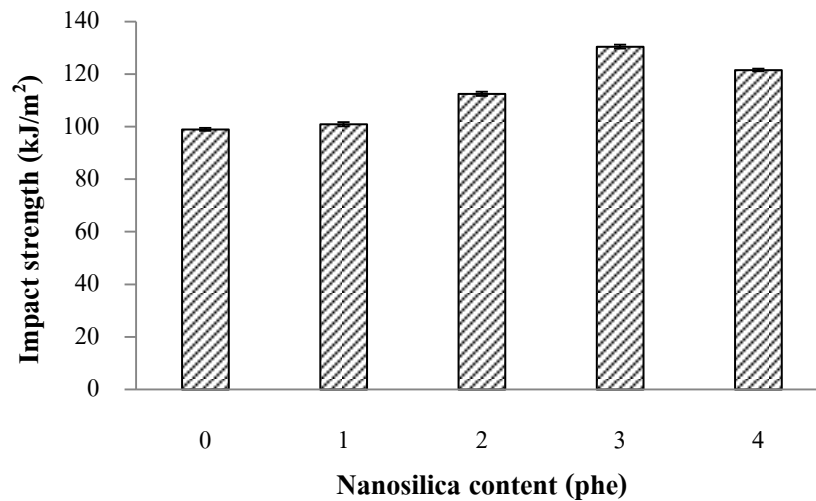


รูปที่ 4.23 ความต้านแรงดัดโค้งของนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

จากรูปที่ 4.23 พบว่าค่าความต้านแรงดัดโค้งของคอมโพสิตแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีการแปรปริมาณของนาโนซิลิกา ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับคอมโพสิตแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ไม่เติมนาโนซิลิกา อาจเป็นไปได้ว่าที่อัตราส่วน 1-2 phe ของนาโนซิลิกาไม่เพียงพอต่อการเสริมสมบัติดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของนาโนซิลิกาเป็น 3 phe จะให้ค่าต้านแรงดัดโค้งที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่เติมนาโนซิลิกา เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของตัวนาโนซิลิกาในเมทริกซ์ได้ดีจึงทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น แม้ความต้านแรงดัดโค้งจะลดลงเมื่อเติมปริมาณนาโนซิลิกามากกว่า 3 phe ซึ่งอธิบายถึง ความสามารถในการต้านแรงดัดลดลงเนื่องจากการกระจายตัว ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคนาโนซิลิกาเมื่อใช้ปริมาณมากจน เกิดการเกาะตัวของอนุภาค สามารถดูผลได้จาก SEM ดังรูปที่ 4.18

4.4.3 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยใช้หน่วยเป็น kJ/m^2 ซึ่งแสดงผลดังนี้



รูปที่ 4.24 ความต้านทานแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

จากรูปที่ 4.24 พบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตเคลือบแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและสูงที่สุดเมื่อเติมนาโนซิลิกา 3 phe กระแทกได้สูงขึ้นเนื่องด้วยอนุภาคของยางมีส่วนดูดซับกระจายพลังงานและตัวนาโนซิลิกามีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวให้แก่เมทริกซ์ของอีพ็อกซีเรซิน ส่งผลให้ค่าความเค้นครากดีขึ้น สำหรับชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อเทียบกับชิ้นที่มีแต่อีพ็อกซีเรซิน แต่เมื่อเติมนาโนซิลิกาที่มากกว่า 3 phe ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง เนื่องจากนาโนซิลิกามีการรวมตัวกันทำให้กระจายตัวได้ไม่ดีในอีพ็อกซีเรซิน ดังหัวข้อที่ 4.10 ส่งผลให้เมื่อนำไปเคลือบบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เกิดการยึดติดกันได้ไม่ดีทำให้ค่าที่ได้ลดลง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 ปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR 50) ที่อัตราส่วน 3 phr สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินได้ดีที่สุด โดยเฉพาะค่าความต้านทานแรงกระแทกที่สูงกว่าอีพอกซีเรซินที่ไม่ได้ปรับปรุงถึง 38.48 %

5.2 เมื่อศึกษาปริมาณนาโนซิลิกาในคอมโพสิทอีพอกซีเรซินผสมยาง ENR 50 พบว่านาโนซิลิกาที่อัตราส่วน 3 phr มีสมบัติด้านความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินผสมยาง ENR 50 ถึง 45.27 % ซึ่งเป็นสมบัติที่ใบพัดต้องการปรับปรุงจึงทำการเลือกอัตราส่วนดังกล่าวมาศึกษาการขึ้นรูปใบพัด

5.3 การขึ้นรูปใบพัดอากาศยานไร้คนขับ พบว่าสูตรที่ได้ปรับปรุงสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานใบพัดอากาศยานไร้คนขับได้ ซึ่งจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยแบบพิมพ์โลหะที่ 1-4 ชั้นเท่านั้น เมื่อใช้จำนวนเกิน 4 ชั้น พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นใบพัดที่สมบูรณ์ได้

5.4 สมบัติของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปใบพัด พบว่าอีพอกซีเรซินที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ยาง ENR 50 และนาโนซิลิกา 3 phr เมื่อนำมาขึ้นรูปร่วมกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะให้สมบัติความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 31 % เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิทอีพอกซีเรซิน

6 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

6.1 ควรศึกษาการใช้งานใบพัดสถานะต่างๆ เช่น การนำใบพัดไปทดสอบการบิน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- กฤษฎา สุชีวะ, สัมมนาวิชาการเทคโนโลยียางใหม่และการประยุกต์ใช้ “Rubber Nanocomposites” 24 มิถุนายน 2557, กรุงเทพฯ (วันที่สืบค้นข้อมูล: 25 ธันวาคม 2560)
- บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ. 2530. ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สุนิสา สุชาติ. 2558. ยางธรรมชาติ: การแปรรูป มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์
- สุวดี ก้องพารากุล. 2008. การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 หน้าที่ 224-233
- Anand, R. F. and Bharat, K. K. 2013. Design and Analysis of Horizontal tail of UAV using composite materials. International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT) – volume 4 Issue 7.
- Boey, F. Y. C., Yap, B. H. and Chia, L. (1999). Microwave curing of epoxy-amine system—effect of curing agent on the rate enhancement. Polymer testing, 18(2), 93-109.
- Brent, S. A. 2008. Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications. Society of Manufacturing Engineers.
- Brunner, A. J., Nicola, A., Rees, M., Gasser, P. H., Kornmann, X., Thomann, R., and Barbezat, M. (2006). The influence of silicate-based nano-filler on the fracture toughness of epoxy resin. Engineering fracture mechanics, 73(16), 2336-2345.
- Chen, Y., Peng, Z., Kong, L. X., Huang, M. F. and Li, P. W. 2008. Natural rubber nanocomposite reinforced with nano silica. Polymer Engineering & Science, 48, 1674-1677.
- Chikhi, N., Fellahi, S., and Bakar, M. (2002). Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber. Eur. Polym. J. 38: 251-264.
- Chuayjuljit, S., Soatthyanon, N. and Potiyaraj P. 2006. Polymer Blends of Epoxy Resin and Epoxidized Natural Rubber. Polym Sci, 452–459.
- Chuayjuljit, S., Nutchapong, T., Saravari, O., and Boonmahitthisud, A. 2015. Preparation and characterization of epoxidized natural rubber and epoxidized natural rubber/carboxylated styrene butadiene rubber blends. Journal of Metals, Materials Minerals, vol. 25, no. 1.

- Epotec. 2014. Composite Applications Epotec Epoxy Systems. Aditya Birla Chemicals (Thailand) Ltd www.Epotec.info (สืบค้นเมื่อ 7 พฤศจิกายน 2561)
- Gan, S. N. and Hamid, Z. A. 1997. Partial conversion of epoxide groups to diols in epoxidized natural rubber. *Polymer*, 38(8), 1953-1956.
- Grassie, N., Guy, M. I., & Tennent, N. H. (1985). Degradation of epoxy polymers: Part 1—Products of thermal degradation of bisphenol-A diglycidyl ether. *Polymer degradation and stability*, 12(1), 65-91.
- Irfan, M. H. 1998. Chemistry and technology of thermosetting polymers in construction applications. Boston: Kluwer academic publisher.
- Ikeda, Y. and Kameda, Y. 2004. Preparation of “Green” Composites by the Sol-Gel Process: In Situ Silica Filled Natural Rubber. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 31, 137-142.
- Jaiganesh, V., Manivannan, S. and Manivannan, S. 2014. Numerical Analysis and Simulation of Nylon Composite Propeller for Aircraft. *Procedia Engineering*, 97, 1079-1088.
- Kocaman, S. and Ahmetli, G. (2016). A study of coating properties of biobased modified epoxy resin with different hardeners. *Progress in Organic Coatings*, 97, 53-64.
- Kohjiya, S. and Y. Ikeda. (2003) "In situ formation of particulate silica in natural rubber matrix by the sol-gel reaction." *Journal of sol-gel science and technology* 26.1-3: 495-498.
- Kohn, P. B. and Pearson, R.A. 2011. Rheological behavior of nanosilica filled epoxies. *PMSE Preps.distance at high nanosilica content. Acta Materialia* 54, 1833–1842.
- Kothmann, M.H., Zeiler, R., Anda, A. R. d., Brückner, A. and Altstadt V. 2015. Fatigue crack propagation behaviour of epoxy resins modified with silica-nanoparticles. *Polymer* 60, 157-163.
- Kotnarowska, D. 1999. Influence of ultraviolet radiation and aggressive media on epoxy coating degradation. *Progress in Organic Coatings*, 37, 149-159.
- Kumar, K.D. and Kothandaraman, B. 2008. Modification of (DGEBA) epoxy resin with maleated depolymerised natural rubber. *Polym. Lett.* 2:302-311.
- Lee, H. and Neville, K. (1982). Handbook of epoxy resins. New York: McGraw-Hill, Inc.

- Liu, F., Zhang, Z.B., Xu, L.L. and Tang, M.S. 2011. Study on the Resistance of Ultraviolet Radiation of Composite Materials Based on Epoxy resin. *Advanced Materials Research*, 391-392.
- Lay, M., Azura, A. R., Othman, N., Tezuka, Y. and Pen, C. 2012. Effect of Nanosilica Fillers on the Cure Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Composites, *Advanced Materials Research*, 626, 818-822.
- Madhusudhan, B.M. and Srihari, P. V. 2014. Design and Analysis of Composite Propeller Blade for Aircraft. *Engineering research and applications*: 2248-9622.
- Peng, Z., Kong, L. X., Li, S.D., Chen, Y. and Huang, M. F. 2007. Self-assembled natural Rubber/silica nanocomposites: Its preparation and characterization. *Composites Science and Technology*, 67(15–16): 3130-3139.
- Pithaksareetham, N. and Suchat, S. Improving the Impact Strength of Epoxy Resin for UAV Propeller Applications with Epoxidized Natural Rubber. 7th International Polymer Conference of Thailand. June 01-02, 2017. Bangkok, Thailand.
- Pithaksareetham, N. and Suchat, S. Improvement of the mechanical properties of epoxy resin composites with ENR 50 for use in wind turbinepropeller. 3rd Asia Pacific Rubber Conference. November 16-17, 2017. Surat Thani, Thailand.
- Pithaksareetham, N., Hongkarnjanakul N. and Suchat S. 2018. Eco-nanocomposites with epoxidized natural rubber for improved mechanical properties essential to unmanned aerial vehicles propeller applications. *Advances in Polymer Technology*, 37 (4).
- Poompradub, S., Thirakulrati, M. and Prasassarakich, P. 2014. In situ generated silica in natural rubber latex via the sol–gel technique and properties of the silica rubber composites. *Materials Chemistry and Physics*, 144, 122-131.
- 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*, 55, 129-137.

- Seng, L. Y., Ahmad, S., Rasid, R., Noum, S. Y. E., Hock, Y. C. and Tarawneh, M. A. A. (2011). Effects of liquid natural rubber (LNR) on the mechanical properties of LNR toughened epoxy composite. *Sains Malaysiana*, 40(7), 679-683.
- Tan, S. K., Ahmad, S. Chia, C. H., Mamun, A. H. and Heim, P. 2013. 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*, 3(3), 55-61.
- Xu, S., Girouard, N., Schueneman, G., Shofner, M. L., & Meredith, J. C. (2013). Mechanical and thermal properties of waterborne epoxy composites containing cellulose nanocrystals. *Polymer*, 54(24), 6589-6598.
- Zarrelli, M., Skordos, A. A. and Partridge, I. K. 2002. Investigation of cure induced shrinkage in unreinforced epoxy resin. *Plastics and Rubber Processing and Application*, 31, 377-384.
- Zhang , A. A., Dehghani, S., Richard S. and Blackburn. 2008. IR study on hydrogen bonding in epoxy resin–silica nanocomposites. *Progress in Natural Science* 18,801–805.

ภาคผนวก

เอกสารเผยแพร่ผลงาน

Improving the Impact Strength of Epoxy Resin for UAV Propeller Applications with Epoxidized Natural Rubber

Nattapon Pithaksareetham¹ and Sunisa Suchat^{1*}

¹Department of rubber Technology, Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University,

Surat Thani Campus, Surat Thani 84000

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

Abstract

Composites were made from epoxy resin and epoxidized natural rubber (ENR). The aim of this research was to improve the impact properties of propellers in unmanned aircraft by mixing epoxidized natural rubber with epoxy resin. The ENR was prepared via *in situ* epoxidation reaction to contain 50 mol % epoxide groups (ENR 50). The fraction of ENR in the blends was from 0 to 10 parts per hundred (phr) relative to the epoxy resin. The results show that the impact strength of epoxy resin can be improved by blending in ENR 50. The optimal ENR content of the composite was 3 phr. Also the tensile strength, Young's modulus and hardness decreased with the amount of ENR. The impact strength was improved to $18 \pm 0.9 \text{ kJ/m}^2$ with 3 phr of ENR, which is the decisive property for propeller applications. The mechanical properties were assessed relative to morphology from scanning electron microscope (SEM) micrographs. It was confirmed that crazing and microcrack formations in the matrix were the main factors affecting fracture toughness. Epoxy resin blends with ENR 50 were tested in propeller blades. The appropriate ENR content of UAV propellers molded with carbon fiber was tested. It was found that the impact strength of this composite can improve the propeller impact strength in UAV applications.

Keywords – UAV Propeller blade, composite, ENR 50, Impact Strength

1. Introduction

When the UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are in flight operation, debris can impact the fast-moving propeller blades and disable the UAV. Therefore, improving ductility of the blade to obtain better impact resistance is desired. An UAV has several components, and the blades are a vulnerable key component usually made from composites, typically with epoxy resins. They may crack particularly during landing impact. The materials used in the composite are carbon fiber, epoxy resins and hardener [1-2]. Nowadays, epoxy resins are used extensively because of their excellent properties such as high modulus, low creep, and reasonable elevated temperature performance [3-4]. Materials that have been added to epoxy solids to improve toughness include hard particulate materials, such as inorganic glass particles [5-7], as well as elastomers and thermoplastics [8-10], such as polybutadiene and butadiene acrylonitrile rubbers [11]. Hypothesizing that the best combination would be liquid rubber [12] with epoxy resin, studied the mechanical properties of blends of diglycidyl ether of bisphenol-A based epoxy resin and hydroxyl terminated, internally epoxidized polybutadiene rubber. Epoxidized rubber was used in order to achieve better bonding between the rubber particles and the epoxy matrix phase. When blends of ENR and maleate nitrile rubber were studied, they had better compatibility with the resin and improved the toughness and impact resistance of the cured resin substantially. Chuayjuljit was studied the effects of ENRs on mechanical and thermal properties across varied rubber contents in the blends [13]. Epoxy resins have been widely used as coatings and matrices in carbon fiber reinforced composites for UAV propeller applications, and also in a wide range of other applications. When cured with hardeners epoxy resins become highly crosslinked, leading to some desirable properties such as high glass transition temperature, high modulus, and undesirable brittleness with low resistance to crack initiation and propagation [14-15]. To improve the fracture toughness of epoxies, adding a rubber phase to commercially available acrylonitrile butadiene copolymers with various functional terminal groups has been well documented [11]. It was found that high molecular weight hyper-branched polymers were effective in improving fracture toughness. ENR rubber particles with a soft material, such as polysiloxane, have been well studied for improving the fracture toughness of brittle epoxies [16]. Fiber reinforced composites are used in twin blade propellers because of their high strength, in low temperature applications. This current work is mainly focused on using ENR in a composite

blade propeller to reduce the risks of tear and breakdown, to improve the performance of blades, and to reduce their deflection.

Natural rubber (NR) from *hevea brasiliensis* trees, composed primarily of cis-1,4-polyisoprene, is an important renewable resource in Thailand, with excellent physical properties. Natural rubber composites have excellent property profiles, combining high stiffness, strength and toughness. NR has been studied to reinforce epoxy resins and other polymers [12, 17].

The objective of this research is to improve the critical mechanical properties of epoxy resin composites for use in unmanned aircraft by mixing in epoxidized natural rubber. In an epoxy resin blend the ENR can improve the impact strength essential to UAV propeller applications.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

- Epoxy resin

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

- Hardener

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

- Rubber

The epoxidized natural rubber was synthesized from natural rubber latex obtained from Muang Mai Guthrie Co. Ltd., in Thailand. The ENR was prepared via *in situ* epoxidation reaction to contain 50 mol % epoxide groups (ENR 50). ENR 50 can confirm with the ¹H-NMR tool. ENR 50 latex is commonly used in this research due to its relatively good properties.

- Composite preparation

The composites were prepared from epoxy resin with ENR 50 contents of 0, 3, 5, 7, and 10 phr (parts per hundred parts of epoxy resin by weight). Polyamide resin (TH 7255) was used as the curing agent.

The compositions of the experimental blends are shown in Table 1.

Table 1 Compositions of the experimental of epoxy resin with ENR 50 blends.

Epoxy resin (g)	ENR 50 (g)	Curing agent (g)
100	0	35
100	3	35
100	5	35
100	7	35
100	10	35

The component mixture was stirred at 50 rpm under room temperature (30 °C) for 10 minutes to mix the epoxy resin with ENR 50. The substance that causes coagulation (Polyamide resin hardener; TH 7255) was added while continuously stirring for 5 minutes at the same stirrer speed. Specimens were prepared by casting the mixture in rubber molds, and formed into dough-moulding compounds (DMC) for application. The UAV propeller composites were prepared from epoxy resin blend with ENR 50 contents of 0, 3, and 7 phr. The carbon fiber was cutting into the contour (50×50 cm) 13 samples, and the UAV propeller procedure using the infusion resin transfer moulding technique. The TH 7255 curing agent polyamide resin was used. However, the UAV propeller specimens were preparation following the ASTM D256 and ASTM D760.

2.2 Composite properties

The composite properties tested were tensile strength according to ASTM D638, tear resistance according to ASTM D264, impact strength according to ASTM D256, Flexural test according to ASTM D790 and hardness (shore D) according to ASTM D2240, across the composite samples

2.2.1. Impact strength

The Izod impact strength of the cured un-notched epoxy resin and ENR 50 was measured at room temperature according to ASTM D256. The specimen dimensions were 63.5 mm x 12.7 mm x 3.0 mm³. The impact strength is reported in kJ/m².

2.2.2 Tensile properties

Tensile properties of the cured test specimens were determined according to ASTM D638 using Lloyd LR10K Universal Testing Machine equipped with 10 kN load cell with the test speed of 50 mm/min. Type I specimen size was used and the gauge length was set at 50 mm.

2.2.3 Morphology

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

2.3 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

The content of epoxide groups in NR after *in situ* epoxidation was estimated by Fourier transform infrared spectroscopy, verifying the 50 mol% content. The product is here labeled ENR 50 according to its content of epoxide groups, and was blended with epoxy resin at various ratios. The blends were successfully cured in silicone casting molds. The cured specimens appeared brownish silvery-yellow in color.

Part 1: Optimizing ENR 50 content in epoxy resin blend

The key mechanical properties at various ENR 50 contents in the epoxy resin were determined: impact strength, hardness, tensile strength, elongation at break and tear strength. These are shown in Table 2 and in Figures 1.

Table 2: The mechanical properties of the ENR 50 content in epoxy resin composites.

ENR 50 (g)	Tensile strength (MPa)	Hardness (ShoreD)	Tear strength (N/mm)	Impact strength (kJ/m ²)
0	25.78±1.46 ^c	82.50±0.50 ^a	187.89±1.09 ^c	11.20±0.48 ^d
3	36.41±1.65 ^a	78.60±0.54 ^b	243.90±0.89 ^a	18.51±0.88 ^a
5	26.88±1.69 ^b	77.70±0.67 ^b	196.10±1.21 ^b	16.38±0.49 ^b
7	27.12±1.10 ^b	77.60±0.65 ^b	144.13±0.66 ^c	12.64±0.65 ^c
10	23.70±1.12 ^d	75.20±0.57 ^c	140.11±1.28 ^d	10.95±0.88 ^d

^{a,b,c,d,e} 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.

From Table 2, the ENR 50 content in the blend had significant effects. The amount of ENR 50 in the blend was 0, 3, 5, 7, or 10 parts per hundred parts of epoxy resin (phr). It was found that the impact strength of epoxy resin could be improved by blending in ENR 50, and was maximal at 3 phr ENR 50 content. Tensile strength and hardness decreased steadily with the amount of rubber, and also tear strength decreased with ENR 50 contents exceeding 3 phr. In addition, hardness of the blends was mostly below those of the epoxy resin. When the ENR 50 content was from 3 to 10 phr, the impact strength decreased which corresponds to the value tensile strength in Table 2. This is due to the increased rubber content resulting in large aggregation, the reduction of the contact surface area between the ENR and the epoxy resin (EP) was reduced, resulting in a decrease in the bond strength between the phases. The downward trend follows. Moreover when the amount of rubber increased bubbles observed in the specimens during curing, as water was not completely removed from the latex. This improves the adhesion of ENR 50 with the polar component of epoxy. However, at 3 phr of ENR 50, the amount of epoxide groups was not enough to improve interfacial compatibility, while the rigid characteristics of these epoxide groups increased brittleness of the structure. As the amount of epoxide increased, impact strength decreased. In addition to rigid characteristics of epoxide groups that increased brittleness, longer reaction times may also have shortened the rubber molecular chains and also hardness of the epoxy is reduced. It is seen that the elongation at break and tear strength of epoxy resin /ENR 50 blends were similar to or better than those of epoxy resin (Table 2). As the amount of rubber in the blends increased, the tear strength decreased. In

terms of the mechanical properties, the epoxy resin with 3 phr ENR 50 was in general the superior case, so this dosing was used in experiments that followed.

The tear resistance as a measure of tear properties is shown in Table 2. The pattern with ENR content is very similar to that seen in tensile strength. The tear resistance was increased then decreased with ENR 50 loading. Nevertheless, in Figure 3 it is also appreciated that 3 phr of ENR 50 loading improved the tear resistance from the epoxy resin baseline. In this indicates compatibility of the rubber with epoxy resin for this case. Through, higher ENR 50 additions exceeding 3 phr, the tear resistance decreased because of larger rubber domains. Then the rubber domain is too weak at epoxide rubber contents that are excessive (>5, 7, and 10 phr).

The impact strength

Figure 2 shows the impact strength with the optimal ENR 50 content in the epoxy resin blend. The ENR 50 in epoxy resin could improve the impact strength markedly. The globular rubber nodules contributed to this toughening effect. However, the amount of ENR 50 at 3 phr in epoxy resin which the impact strength and tensile strength were increasing. This is due to the small particle size (Figure 2). The contact surface area between the ENR 50 at 3 phr and the EP increases and the adhesion between the rubber phase in EP the matrix is higher.

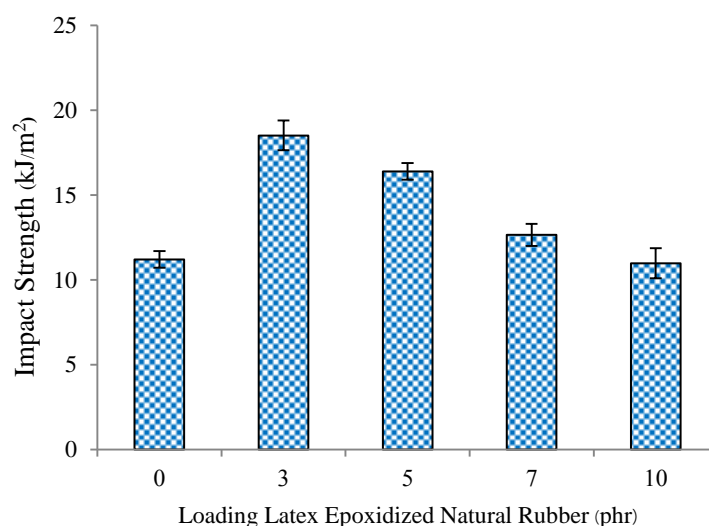
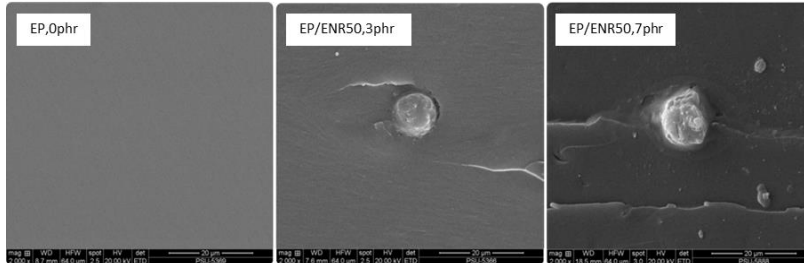


Figure 1. The impact strength at various ENR 50 contents in epoxy resin.

Morphology

The morphology of epoxy resin with ENR 50 (0, 3, or 7 phr) was observed from SEM images (Figure 2).



Part 2: Properties and forming the UAV propeller blades

The key mechanical properties for UAV propeller blades were determined: impact strength, hardness, and tear strength. These are shown in Table 3 and in Figure 3.

From Table 3, when carbon fibers are used to fill epoxy resin the stiffness is not significantly affected. Since rubber is highly flexible in the composite propellers, it improves both impact and flexural strengths from the original.

Table 3: The mechanical properties of composite for UAV propellers.

ENR 50 (g)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (%)	Hardness (barcol)
0	136.17±3.22 ^b	572.83±4.93 ^b	94.53±0.57 ^a
3	142.28±2.47 ^a	586.03±4.04 ^a	94.00±1.10 ^a
7	140.70±4.10 ^a	577.31±5.42 ^b	92.00±2.00 ^b

^{a,b} Different superscripts within a column indicate statistically significant differences at 95% confidence by Duncan's method. Mean±SD: mean and standard deviation based on triplicate samples.

Application to UAV propeller blades

The composites from epoxy resin with ENR 50 had improved impact strength, required in UAV propeller blade applications. The blends were successfully cured in silicone casting molds. The cured specimens appeared brownish yellow in color, as shown in Figure 5. Blended resin specimens had more cloudy appearance than the baseline epoxy resin. The baseline

UAV propeller blades are carbon fiber filled in epoxy resin, and the addition of 3 phr ENR 50 in the composite was established. The impact strength was improved, up from 136.17 ± 3.22 , 142.28 ± 2.47 , and 140.70 ± 4.10 kJ/m^2 respectively, by the added ENR 50. It was found that, the impact strength of this composite can improve the propeller impact strength in UAV applications.



Figure 3. Top view of UAV blades prepared from the experimental composites:

(a) pure epoxy resin; (b) Epoxy resin with 3 phr ENR 50; (c) Epoxy resin with 7 phr ENR 50

4. Conclusion

ENR 50 at 0, 3, 5, 7, or 10 phr was mixed into epoxy resin in the presence of an amine curing agent, and the mechanical and physical properties as well as the fracture surface morphologies were investigated. It was found that the impact strength was enhanced by 3 phr ENR 50 content; it was improved to 18 ± 0.9 kJ/m^2 , this is due to the compatibility between the rubber particles with the epoxy matrix and small particle size from Figure 2, the contact surface area between the ENR 50 at 3 phr and the epoxy resin was increases. The addition of rubber particles to the epoxy might act as an impact modifier to absorb the impact loading and cause the effective stress concentration behavior, which is the key property desired in propeller applications. Tensile strength and hardness decreased steadily with the rubber content. The baseline UAV propeller blades are carbon fiber filled epoxy resin, and the addition of 3 phr ENR 50 in the composite was tested. The impact strength was improved, up from 136.17 ± 3.22 , 142.28 ± 2.47 , and 140.70 ± 4.10 kJ/m^2 respectively, by the added ENR 50.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge financial support by the Gistda. Prince of Songkla University also supported this work. The authors would like to thank Dr. Seppo Karrila for english correct in manuscript.

References

- [1] Jaiganesh, V. and Manivannan, S., “Numerical Analysis and Simulation of Nylon Composite Propeller for Aircraft”, *Procedia Engineering* : 1079-1088 (2014).
- [2] Madhusudhan, B.M. and Srihari, P. V., “Design and Analysis of Composite Propeller Blade for Aircraft”, *Engineering research and applications: 2248-9622* (2014).
- [3] Butta E., Levita G., Marchetti A. and Lazzeri A., “Morphology and of amine-terminated butadiene-acrylonitrile/epoxy blends”. *Polym Eng Sci* : 6373 (1986).
- [4] Kang, B.U., Jho, J.Y., Kim, J., Lee, S.S., Park, M., Lim, S. and Choe, C.R.J. “High performance HTLNR/epoxy blend—phase morphology and thermo-mechanical properties”, *Appl Polym Sci* : 38- 79 (2001).
- [5] Das, G. and Karak, N., “Thermostable and flame retardant Mesua ferrea L. seed oil based nonhalogenated epoxy resin/clay nanocomposites”, *Progress in Organic Coatings* : 495-503 (2010).
- [6] Guadagno, L., Vertuccio, L., Sorrentino, A., Raimondo, M., Naddeo, C., Vittoria, V., Iannuzzo, G., Calvi, E. and Russo, S., “Mechanical and barrier properties of epoxy resin filled with multi-walled carbon nanotubes”, *Carbon* : 2419-2430 (2009).
- [7] Jin, F. L. and Park, S. J., “Interfacial toughness properties of trifunctional epoxy resins/ calcium carbonate nanocomposites”, *Materials Science and Engineering: A* : 190-193 (2008).
- [8] Kelly, P., “Epoxy vinyl ester and other resins in chemical process equipment. Reinforced Plastics”, *Durability, Cambridge, UK, Woodhead* : 282-293 (1999).
- [9] Hong, S. G. and Chan, C. K., “The curing behaviors of the epoxy/dicyanamide system modified with epoxidized natural rubber”, *Thermochimica Acta* : 99-106 (2004).
- [10] Poompradub, S., Thirakulrati, M. and Prasassarakich, P., “In situ generated silica in natural rubber latex via the sol–gel technique and properties of the silica rubber composites”, *Materials Chemistry and Physics* : 122-131 (2014).

- [11] Levita, G, Marchetti, A. and Lazzeri, A., “Toughness of epoxies modified by preformed acrylic rubber particles”, *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia*: (1991).
- [12] Saleh, A. B. B., Ishak, Z. A. M., Hashim, A. S., Kamil, W. A. and Ishiaku, U. S., “Synthesis and Characterization of Liquid Natural Rubber as Impact Modifier for Epoxy Resin”, *Physics Procedia* : 129-137 (2014).
- [13] Chuayjuljit, S., Soatthiyanon, N. and Potiyaraj P., “Polymer Blends of Epoxy Resin and Epoxidized Natural Rubber”, *Polym Sci* : 452–459(2006).
- [14]. Bussi, P. and Ishida, H., “Partially miscible blends of epoxy resin and epoxidized rubber: Structural characterization of the epoxidized rubber and mechanical properties”, *polymer scienc* : 441-454(1994).
- [15] Levita, G, De Petris, S, Marchetti, A. and Lazzeri, A., “Crosslink density and fracture toughness of epoxy resins”, *Journal of materials science* : (1991).
- [16] Bussi, P. and Ishida, H., “Dynamic mechanical properties of epoxy resin / epoxidized rubber blend effect of phase separated rubber”, *polym. sci., part B*:647-657 (1994).
- [17] Lee, Y.S., Ahmad, S.H., Rasid, R., Noum, S.Y.E., Yew, C.H. and Mou, A.T., “ Effects of liquid natural rubber (LNR) on the mechanical properties of LNR toughened epoxy composite”. *Sains Malaysiana*, 40(7), 679-683 (2011).

**Improvement of the mechanical properties of epoxy resin composites with ENR 50 for use
in wind turbinepropeller**

Nattapon Pithaksareetham¹, Chainuson Kasagepongsarn², Priwan Pongwan³, Montri Suklueng³ and
Sunisa Suchat^{1*}

¹Department of rubber Technology, Faculty of Science and Industrial Technology,
Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani, Thailand

²Renewable Energy and Environmental Research for Local Community Unit (REERCU),
Surat Thani Rajabhat University, Surat Thani, Thailand

³Energy Systems Research Institute Interdisciplinary Graduate School of Energy System,
Prince of Songkla University, Thailand

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

Keywords: wind turbine propellers, liquid epoxidized natural rubber, mechanical properties

Abstract: Thailand is among the globally significant producers of natural rubber, with about 35% in 2558 share of the global production. Modified natural rubbers contain 50 mol % epoxide groups (ENR 50) The ENR 50 rubber blocks were dissolved in tetrahydrofuran (THF) solvent to 4% concentration while stirring for 48 hours at 30°C by way of LENR 50. The blend was compared to the baseline epoxy resin mixed with LENR 50 solution in testing for wind turbine propeller blades. The LENR 50 contents tested were 0 to 10 phr (parts per hundred parts of epoxy resin). The resin blends were measured for mechanical properties and morphology. The results showed 3 phr as the optimal LENR 50 content in the composites, giving the highest impact and tensile strengths. The morphology was assessed from SEM micrographs and associated with the mechanical properties. These resin composites have improved mechanical properties vital in wind turbine propeller applications.

1. Introduction

Thailand can produce electricity from multiple energy sources including natural gas, coal (Lignite), crude oil, and others alternative energy (wind power, solar energy, water power, etc.). The main sources of power release greenhouse effect, so it is necessary to accelerate the search for cleaner energy sources [1]. Wind power is a clean form of renewable energy source at interestingly, because it is a direct energy from nature, which is environmentally friendly. The main component in wind turbines generating electricity is the wind turbine blade. The material used to make wind turbine blades must be lightweight, strong and highly flexible. Generally, the wind turbine blades are made from fiberglass with epoxy resin. Such composite works well at elevated temperatures and is more capable of bending at high temperatures than polyester [2]. However, the epoxy resin composites are brittle and not resistant to ultraviolet light, and they thermoset [3]. However, when using epoxy resins blended with fiber glass, it also fracturing and brittleness emerge especially at high temperatures under high stresses. The wind turbine blade use for generates electricity. The turbine blades also get corroded by the friction dust in the airflow. For this reason, to improve the blades, composites have been made of epoxy resin mixed with epoxidized natural rubber (ENR). When used with reinforcement fibers, this mix gives good adhesion, reduces stress, low corrosion, low fracture tendency and is not fragile [4-5]. Natural rubber addition can improve epoxy resins. The use of liquid epoxidized natural rubber with 50 mole percent level of epoxidation (LENR 50) is a good choice for improving the impact resistance of epoxy resin. in a solvent has been demonstrated to improve the mechanical properties [6-8]. The rubber serves as a toughening agent when dispersed in a matrix of epoxy to improve the toughness of cured epoxy.

Therefore, the objective of this research was to use rubber solvents in improving the mechanical properties on epoxy resin composites with LENR 50, for use in wind turbine propellers.

2. Materials& methods

2.1 The Bisphenol-type epoxy resin (Epicholrohydrin–bisphenol A: Epotec YD 535 LV), the curing agent polyamide resin (TH 7255) were supplied from Neotech Composite Co., Ltd., Thailand.

2.2 LENR preparation: The epoxidized natural rubber block were cut into small pieces and was dissolved to 4% concentration in tetrahydrofuran (THF) solvent, stirring for 48 hours at room temperature. ENR 50 was obtained from Muang Mai Guthrie Co., Ltd. in Thailand, and THF from Chemical Supplies and Laboratory Co., Ltd.

2.3 Composite preparation: The epoxy resin (100 phr) was mixed with various LENR 50 contents (0, 3, 5, 7, and 10 phr), and with the curing agent 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 LENR 50, then for 5 minutes with the polyamine hardener at the same stirrer speed. Specimens were prepared by casting the mixture in rubber molds.

2.4 The mechanical properties measurement

-Izod impact strength of the cured epoxy resin with LENR 50 was measured at room temperature according to ASTM D256. The specimen dimensions were 63.5 x 12.7 x 3.0 mm³.

- The hardness (shore D) was tested according to ASTM D2240. The specimens used were referred to 8 specimen test interchangeably, shall be at least 6.0 mm in thickness.





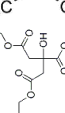
2.5 Morphology: Samples for scanning electron microscopy (SEM) were coated with thin gold/palladium layer before SEM imaging (Cambridge Stereos can 200).

3. Results and discussion

3.1 Preparation of LENR 50solution

The solvents shown in Table 1 were used LENR 50 solution preparation.

Table 1 Characteristics of solvents for dissolution of rubber

Component	Chemical structure	Density (gcm ⁻³)	Solubility parameter of Solvent (MPa) ^{1/2}	Boiling point (°C)
Tetrahydrofuran		0.89	18.5	66
Toluene		0.87	18.2	110.6
Chloroform		1.49	18.7	61.2
Acetone		0.79	19.7	56
Turpentine		0.87	16.6	154–170

* Solubility parameter of ENR 50 : 18.2 (MPa)^{1/2}

The dissolving ability of solvents



Fig.1 LENR 50 dissolving in five types of solvents

Fig. 1 shows the LENR 50 in five solvents after 12 hours at room temperature (30 °C). It was found that chloroform, acetone, and there turpentine had poorer ability to dissolve rubber than THF Both THF and toluene clearly provided homogeneous solutions. This might be due to the chemical structures: oxiranrings in LENR 50 interacted with polar THF. THF was selected for this study because of its low boiling point, so this solvent can be evaporated at room temperature.

3.2 Epoxy resin/LENR 50 composite

3.2.1 The mechanical properties

The mechanical properties was measured the hardness and impact resistance of epoxy resin blended with LENR 50 using 0, 3, 5, 7 and 10 phr of LENR 50.

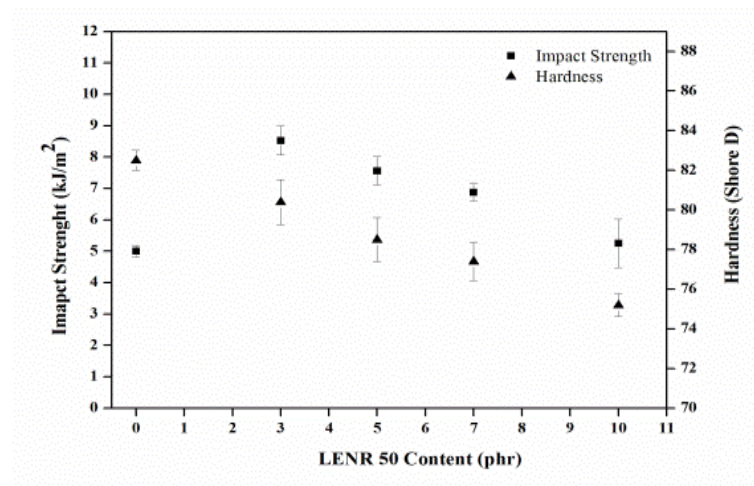


Fig.2 The impact strength at various LENR 50 contents in epoxy resin

In Fig.2 above represent the hardness and impact resistance of EP/LENR 50 films with 0, 3, 5, 7 and 10 phr of LENR 50 are shown. The specimen with 3 phr LENR 50 exhibited superior impact resistance properties. This composite had better dispersion and smaller rubber particles than the other cases, as seen in Fig. 3. The rubber particles might act as impact modifiers that absorb the impact loading. The dispersion of LENR 50 worsened with further increased LENR 50 content. The high loading with LENR 50 tended to form large rubber domains reducing interactions with the matrix phase and forming weak points in the EP matrix. On the other hand, the hardness tended to decrease with LENR 50 loading. This is because smoother surface of the specimen was obtained with larger amounts of flexible LENR 50.

3.4 Morphology

The morphology of epoxy resin with LENR 50 (0, 3, or 7 phr) from SEM images (Fig.3)

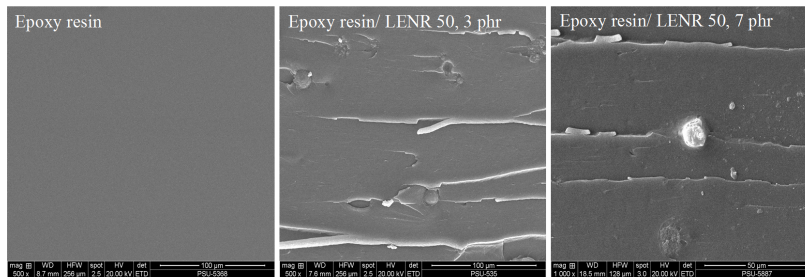


Fig.3SEM micrographs of epoxy resin with various LENS 50 contents (0, 3 or 7 phr)

Fig. 3 showing the morphologies of epoxy resin blended with 3 phr LENS 50 composites, and various amounts of 3 and 7 phr are controlled with the pure epoxy resin. The interfacial interactions of epoxy resin blended are improved in the case of LENS 50. Scanning electron microscope micrographs of the fracture surfaces suggest that the toughening of epoxy resin composite was induced by the LENS 50 globular nodules attached to the epoxy matrix, improving the impact strength from the rubber and epoxy resin interfacial interactions are improved. SEM micrographs show that as the amount of epoxide groups increased, the interfacial adhesion between rubber and epoxy resin improved. EP blended with LENS 50, was presumably due to stronger interfacial bonding between the two as well as shorter rubber molecular chains. Consequently, good distribution of small globular nodules was achieved, though, the rigidity of epoxide groups caused low strain crystallization in the LENS 50.

3.5 Application to wind turbine propeller blades

The composites from epoxy resin with LENS 50 had improved impact strength, required in wind turbine propeller blades. The blends were successfully cured in casting molds. The cured specimens appeared brownish yellow in color (Fig.4). Resin blended specimens had more cloudy appearance than the baseline epoxy resin. The baseline wind turbine propeller blades have fiber filler in epoxy resin, and 3 phr LENS in the composite was tested. The impact strength was improved up from 5 ± 0.18 , 8.5 ± 0.46 and $6.8 \pm 0.27 \text{ kJ/m}^2$ by added LENS at 0, 3 and 7 phr, respectively. These composites have improved mechanical properties vital in wind applications

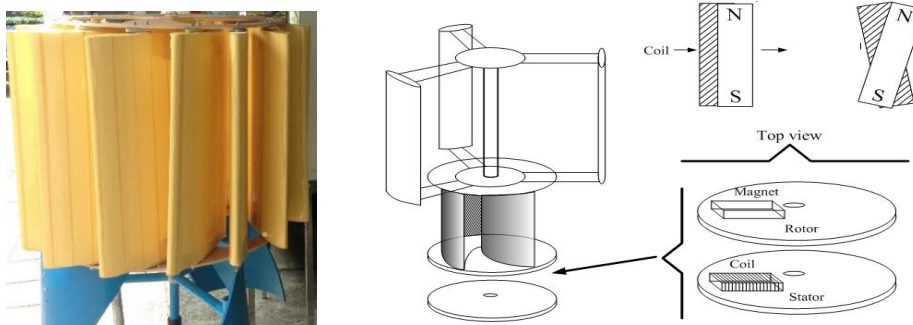


Fig.4 Top view of the wind turbine propeller prepared for experimental testing

4. Conclusion

Liquid epoxidized natural rubber with 50 mole percent level of epoxidation (LENR 50) is a good choice for improving the impact resistance of epoxy resin. Addition of LENR 50 at 3 phr level gave optimum results for both bending and impact properties due to good dispersion in the epoxy matrix, while loading levels 5, 7 and 10 phr gave worse dispersion and poorer properties.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand, Natural Rubber Research Institute, Prince of Songkla University for financial support. We are also grateful to Assoc. Prof. Seppo Karrila of the Prince of Songkla University for assistance manuscript preparation.

References

- [1]S. Chingulpitak, S. Wongwiset, Critical review of the Current Status of Wind energy in Thailand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,31(2014) 312-318.
- [2]S. A. Brent, *Fundamentals of composite manufacturing: materials, methods and applications*. Society of Manufacturing Engineers. 2 (2008)45.
- [3]W.D. Bascom, D.L. Hunston. Fracture of elastomer-modified epoxy polymer: a review. In. *Review. Rubber-Toughened Plastics*,(1989)135-172.

- [4]Y.Huang, D.L.Hunston, A.J. Kinloch, C.K.Riew, Mechanisms of toughening thermoset resins. In. Riew.Toughened Plastics,(1993) 1-38.
- [5]A.J. Kinloch, Relationship between the microstructure and fracture behavior of rubber-toughened thermosetting polymer. In. Riew, C.K. (ed.). Rubber-Toughened Plastics,(1989) 67-92.
- [6]S. K. Tan, S. Ahmad, C. H. Chia, A. Mamun, H. 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. 3 (2013) 55-61.
- [7]S.Chuayjuljit, N.Soatthiyanon, P. Potiyaraj, Polymer blends of epoxy resin and epoxidized natural rubber. Journal of applied polymer science.102(2006) 452-459.
- [8]A. B. B.Saleh, Z. A. M.Ishak, A. S.Hashim, W. A. Kamil,U. S Ishiaku, Synthesis and characterization of liquid natural rubber as impact modifier for epoxy resin.Physics Procedia.55 (2014)129-137.

**Eco-nanocomposites with Epoxidized Natural Rubber for Improved Mechanical Properties
Essential to UAV Propeller Applications**

Nattapon Pithaksareetham¹, Natthawat Hongkarnjanakul², Sunisa Suchat^{1*}

¹Prince of Songkla University, Faculty of Sciences and Industrial Technology, Surat Thani Campus, P.O. Box 8, Khuntalea Post Office, Muang District, Surat Thani, 84100, Thailand

²Geo-Informatics and Space Technology Development Agency, 88 Moo 9, Thung Sukla, Si Racha, Chonburi, 20230, Thailand

*Corresponding author, e-mail: sunisa.su@psu.ac.th, sun.isa.su@hotmail.com

ABSTRACT

The epoxidized natural rubber (ENR) was prepared via *in situ* epoxidation reaction to contain 50 mol % epoxide groups (ENR 50). The fraction of ENR in the blends was 2-10 parts per hundred relative to the epoxy resin (phr). Also the silica nanoparticle content of epoxy resin was tested for 1-5 % by weight. The results show that the impact strength of epoxy resin can be improved by blending in ENR mixed with nanosilica, relative to the baseline Epoxy and Epoxy resin mixed with epoxide. The optimal ENR 50 content of the composite was 3 phr. Also the impact and tensile strength of the nanocomposite containing 3% nanosilica were improved. In addition, the tear strength of the nanocomposite slightly decreased with the addition of nanofillers. The mechanical properties were assessed relative to morphology from SEM micrographs. In epoxy resin blends with ENR 50, nanosilica can improve the impact strength required in UAV propeller applications.

KEYWORDS: unmanned aerial vehicles, propeller blade, eco-nanocomposites, epoxidized natural rubber, nanosilica

1. INTRODUCTION

The high performance blades of unmanned aerial vehicles (UAV) are increasingly made from carbon fiber reinforced polymers (CRFP). During flight operation, debris can impact the fast moving blades and disable the UAV. Therefore, improving ductility of the

blade to obtain better impact resistance is desirable, and this might be accomplished by changes in design or manufacture of UAV technology. The UAV has several components, with the blades a vulnerable key component usually made from composites, typically with epoxy resins. They may crack particularly during landing impact. The materials used in the composite are carbon fiber, epoxy resins, and hardener. The propellers can be made of a polymer that satisfies the mechanical requirements. When nylon 6 hybrid polymer was added to the other raw materials, this improved the mechanical properties in the propeller, reducing also the weight of the propeller due to high strength per weight.^[1] A composite material is a heterogeneous combination of two or more materials differing in form or composition on a macro scale. The reinforcing material can be, for example, carbon fibers or polymers, and is embedded in the other materials forming a continuous matrix phase. The composite propeller blades perform better than wooden blades. To reduce deflection, stiff blade materials can be used inside the composite propeller blades.^[2]

Nowadays, epoxy resins are used extensively because of their excellent properties, such as: high modulus, low creep, and reasonable elevated temperature performance. However, they easily fail under impact force.^[3-4] Materials that have been added to epoxy for improve toughness include hard particulate materials such as inorganic glass particles,^[5] thermoplastics materials and elastomers materials,^[6] butadiene acrylonitrile rubbers materials.^[7] This has given substantial toughness improvements without significantly affecting supplementary important properties. As epoxies are viscous liquids, their handling and forming is relatively easy. Therefore, the best combination would be the addition of a liquid rubber to the epoxy resin according,^[8] who studied the mechanical properties of blends of diglycidyl ether of bisphenol-A based epoxy resin and hydroxyl terminated, internally epoxidized polybutadiene rubber. Epoxidized natural rubber was used in order to achieve better bonding between the rubber particles and the epoxy matrix.^[9] When blends of ENR and maleates of nitrile rubber were studied, these had better compatibility with the resin and improved the toughness and impact resistance of the resin substantially.^[10] The effects of ENR on mechanical and thermal properties across varied rubber contents in the blends. Epoxy resins are used as the matrix in many polymer-matrix composites.^[11] They are used in fiber-reinforced polymer composites for various aerospace applications, wind blades and among others. It is known that the tensile stress and yield stress of a polymer are time dependent. Therefore, the fracture behavior and failure mechanisms of epoxy

resin are contingent on the loading rate, which depends on the engineering application. Even less work has been devoted to the fracture behavior and mechanisms of pure epoxy resin, which is fundamental to understanding the reliability of epoxy resin-matrix composites.

The vulcanizates prepared with amine (hardener) products showed unexpected deformation capacity. Tear strength and impact strength zone striations were present on fracture surfaces in such epoxy rich composites. Problems can be caused by stresses in a composite propeller even when, based on static analysis, they are within the allowable stress limits. The main development targets for these composites are improved impact strength and reduced cost. This current work is mainly focused on using natural rubber in a composite blade propeller to reduce risks of tear and breakdown, to improve the performance of blades, and to reduce their deflection.^[9]

Epoxy resins have been widely used as coatings and matrices in carbon fiber reinforced composites for UAV propeller applications, and also in a wide range of other applications.^[9] When cured with hardeners, epoxy resins are highly crosslinked, leading to some desirable properties such as high glass transition temperature and high modulus; and to undesirable brittleness with low resistance to crack initiation and propagation.^[12-13] To improve the fracture toughness of epoxies, adding a rubber phase, such as commercially available butadiene-acrylonitrile copolymers with various functional terminal groups, has been well documented.^[7] The volume fraction of the toughening rubber phase varies from 5 to 20%. However, the added rubber phase increases the viscosity of the epoxy resin mixture, and reduces the crosslink density, modulus, and tensile strength dramatically.^[10] High performance thermoplastic engineering polymers have also been used as toughening agents for aromatic epoxy resins. It was found that higher molecular weight hyper-branched polymers were effective in improving fracture toughness. ENR rubber particles with a soft material, such as polysiloxane, have been well studied for the improvement of fracture toughness of brittle epoxies,^[14-15] and the glass transition temperature remained almost unchanged. Fiber reinforced composites are used in twin blade propellers because of their high strength in low temperature applications. The fibers must be oriented in the loading direction in the design of a composite propeller blade of fiber reinforced plastics and epoxy resin materials.^[9]

Natural rubber (NR) crop from *Hevea brasiliensis* trees, composed primarily of cis-1,4-polyisoprene, is an important renewable resource in Thailand with excellent physical properties. Natural rubber composites have excellent property profiles, combining high stiffness, strength and toughness. Nanoparticles were applied in several studies to reinforce epoxy resins and other polymers. Considerable research has been performed on the incorporation of low and high aspect ratio nanofillers, and these have already demonstrated their ability to improve the toughness of polymers.^[16] Still, high material costs, complex processes and limitations in production technology hamper production and application of these composites on a large industrial scale. Specifically, there are still difficulties to disperse the nanoparticles homogeneously in the matrix.

Filler has been widely used to create high-performance or high-function materials over the last few decades. Silicon alkoxide and silica can be used in sol-gel processes to synthesize organic/ inorganic composites.^[17-18] Silica has also been successfully used to control the rheology of organic/inorganic hybrids, according to research focused on storage modulus,^[19] shear thickening or thinning, thixotropy, and yield point.^[20] Additionally, silica particles can be used to reinforce polymer matrices to reduce shrinkage on curing, and to decrease thermal expansion coefficient.^[21] Furthermore, surface modified silica nanoparticles have been blended in resins to improve fracture toughness,^[22] In general, the relatively high loadings of nanosilica have reached up to 25 vol%.^[23] Nanosilica particles formed *in situ* through sol-gel reactions showed good dispersion and particle size distribution in an epoxy resin system.^[24] There are also reports on improved fracture toughness of epoxies by simultaneous addition of both hard nanosilica particles and soft rubber phase. It was found the nanosilica particles and micro-sized rubber particles showed synergies in improving the fracture toughness of the epoxy resins, when the nanoparticle concentration was low. On using silica based nanoparticles with hard silica and soft rubber as toughening agents for epoxy, low loading of such nanoparticles will not increase the viscosity much, while the mechanical properties are enhanced significantly.

Colloidal nanosilica has extremely high specific surface, which makes it ideal for a wide variety of applications in dispersions, coatings, ceramics, cosmetics, biosensors, colorants and abrasion-resistant polymers. A large number of studies have dealt with colloidal

silica (silica nanoparticles have diameters ranging from 7 to 22 nm) for a variety of purposes and applications.^[25] However, a major challenge in working with colloidal silica is

the characterization of the suspension properties, particularly the nanoparticle concentration. Numerous means have been used to directly or indirectly determine the size, shape, charge and/or concentration of colloidal particles.

The objective of this research is to improve the critical mechanical properties of eco-nanocomposite from epoxy resin blend with ENR 50 and nanosilica, for use in UAV propeller applications. An eco-nanocomposite can provide improved impact strength required by unmanned aircraft, together with benefits in economy and environmental friendliness from using natural rubber crop as renewable material.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materials

Natural rubber (ENR 50)

The liquid epoxide natural rubber was synthesized from natural rubber latex, obtained from Muang Mai Guthrie Co., Ltd. in Thailand. The ENR was prepared via *in situ* epoxidation to 50 mol % epoxide content (ENR 50). The ENR 50 is commonly used in the industry due to its relatively good properties.

Epoxy resin

The epoxy resin used was a Bisphenol-type epoxy resin (Epichlorohydrin-bisphenol A: Epotec YD 535 LV, number average molecular weight less than 700 g/mol) purchased from Aditya Birla Chemical Industry Co., Ltd., in Thailand.

Curing agent, Hardener (TH 7255)

The curing agent hardener (polyamine resin) was supplied by Siam Chemical Industry Co., Ltd., in Thailand.

Carbon fiber

Composed of at least 90 percent carbon, the carbon fibers have diameters from about 0.005 to 0.10 mm, and bulk density 1.7 (g/cm³), purchased from Neotech Composite Co.,

Ltd., in Thailand. Carbon fibers have high abrasion resistant, tensile strength in the perpendicular direction and impact resistance.

Filler (Nanosilica)

Nanoscale silica particles were synthesized and silica phase consists of surface-modified SiO₂ nanospheres with a defined size of 20 nm suspended into the H₂O with 40 wt%. Weight average molecular weight (Mw) of the nanosilica was 60.08 g/mol and specific surface area was 135 m²/g. The commercial product of Sigma-Aldrich (Nanopox E470, 40 wt% SiO₂, Bossofticl. Ltd).

2.2 Sample preparation

Epoxidized natural rubber (ENR)

Preparation and characterization of epoxidized natural rubber with about 50 mol% epoxidation was successfully prepared via in situ performic acid epoxidation from 60% DRC (dry rubber content) concentrated natural rubber latex (HA: high ammonia preservative) with, using 0.5 M hydrogen peroxide (H₂O₂), polyalcohol ethyleneoxide condensate (Terric 16A-16) and 0.75 M reagent-grade formic acid (HCOOH). The reaction was allowed to proceed at 50°C for 8 hours.^[25]

Eco-nanocomposite sample preparation for characterization

The composites were prepared with epoxy resin as the main material, with other contents referred to its 100 phr (part per hundred of epoxy resin). In prior work an ENR 50 content of 3 phr was established, as this ratio provided superior properties.^[9] The nanosilica contents tested were 0, 1, 3 and up to 5 phr, for optimal content in the eco-nanocomposite. Polyamine resin (TH 7255) was used as the curing agent.

The eco-nanocomposite compositions had epoxy resin (100 phr), ENR 50 (3 phr), polyamine resin (35 phr) and nanosilica contents up to 5 phr. The component mixture was stirred at 50 rpm at room temperature (30°C) for 10 minutes to mix the epoxy resin with ENR 50 and nanosilica. The substance that causes coagulation polyamine resin was added while

continuously stirring for 5 minutes at the same stirrer speed. Specimens were prepared by casting the mixture in rubber molds and formed into dough-moulding compounds (DMC) for further use.

UAV propeller building

The mold UAV propeller sizes were had length 60 cm width 25 cm, and thickness 4 cm was prepared from epoxy resin with ENR 50 and nanosilica. The component mixture was stirred at 50 rpm at room temperature (30°C) for 10 minutes to mix the epoxy resin with ENR 50 and nanosilica. The substance that causes coagulation polyamine resin (TH 7255) was added while continuously stirring for 5 minutes at the same stirrer speed. Specimens were prepared by casting the mixture in rubber molds and formed into dough-moulding compounds (DMC) for application. The UAV propeller composites were prepared from epoxy resin blend with ENR 50 at nanosilica contents of 1, 2, 3 and 4 phr and compared to baseline without nanosilica. The carbon fiber composites were cut to test pieces (40×40 mm) for 13 trials and the UAV propeller preparation used the infusion transfer moulding technique.^[26] The polyamine resin (TH 7255) curing agent polyamine resin was used.

2.3 Characterization

The characterization of eco-nanocomposite samples from epoxy resin blended with ENR 50 and nanosilica with and without carbon fiber was done as follows.

2.3.1 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis

Approximately 15 mg of composite sample was used for FT-IR analysis. Fourier transform infrared spectra were recorded using a Vertex 70, (Bruker, Karlsruhe, Germany), which was equipped with a germanium ATR crystal probe and allows direct recording of the spectra from ENR composite samples without sample preparation. The recorded spectra were averages of 32 scans over the wave number range 4000-400 cm⁻¹ at 4 cm⁻¹ resolution. A background scan of the clean diamond was recorded before scanning the samples. The prepared ENR cases were characterized for their mol % epoxidation calculated from equation 1, using the characteristic FT-IR peaks in the spectra of epoxide groups (A_{ENR}) and the spectra of natural rubber structure (A_{NR}) (=C-H).^[27]

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

2.3.2 Nuclear magnetic resonance (NMR) analysis

Approximately 50 mg of the ENR sample was dissolved in CDCl_3 and analyzed for one-dimensional $^1\text{H-NMR}$ at 400 MHz using a Bruker DPX 300 Fourier transform NMR spectrometer operating at 300 MHz (Bruker, Rheinstetten, Germany). The protons of the double bonds in the natural rubber structure (I_{NR}) were assessed. Therefore, the epoxide content was obtained from the change in the bonding of the double bonds in the rubber with epoxide (I_{ENR}).

The prepared ENR were characterized for their mol % epoxidation according to equation 2, using the $^1\text{H-NMR}$ characteristics.^[28]

$$\text{Mol \% epoxidation} = [I_{\text{ENR}} / (I_{\text{ENR}} + I_{\text{NR}})] \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

2.4 Mechanical properties of eco-nanocomposite

The mechanical properties of eco-nanocomposites (blend of epoxy resin with ENR 50 and nanosilica) were determined. The impact strength was measured according to ASTM D256, tensile strength according to ASTM D638, flexural strength according to ASTM D790, tear strength according to ASTM D264 and hardness (shore D) according to ASTM D2240.

2.4.1 Impact strength

The Izod impact strength of the cured un-notched epoxy resin and eco-nanocomposites with ENR and nanosilica was measured at room temperature according to ASTM D256. The specimen dimensions were 63.5 mm x 12.7 mm x 3.0 mm³.

2.4.2 Tensile strength

The tensile test was performed according to ASTM D638. Testing machine equipped with 10 kN load cell had extension speed of 50 mm/min. Type I specimens with 50 mm x 3 mm in working and gauge lengths were used.

2.4.3 Flexural strength

This was determined per ASTM D790 for all samples with a recommended span to depth ratio of 16 : 1. The size of the specimen was length 127 mm, width 12.5 mm, and thickness 3 mm³. The flexural test was conducted on the same machine with feed rate of 1.2 mm/min.

2.4.4 Tear strength

The tear strength test was done according to ASTM D264. Testing machine was equipped with 10 kN load cell had extension speed was 50 mm/min. Die B: a tear specimen in

dumbbell shape, had length 110 mm, width 25 mm, and thickness 2.2 mm in the working and the gauge lengths were used.

2.4.5 Hardness

The hardness (shore D) was tested according to ASTM D2240. The specimen, herein referred to 8 specimen test interchangeably, shall be at least 6.0 mm in thickness were used. The hardness (Barcol) was tested according to ASTM D2538 for the eco-nanocomposite. The specimens shall be at least 1.5 mm thick and a minimum distance of 3 mm in any direction.

2.5 Morphology

Scanning electron microscopy (SEM) samples were coated with thin gold/palladium layer and examined in a SEM Cambridge Stereoscan 200 (FEI-Quanta 400, Jeol Ltd., Tokyo, Japan). SEM inspection was focused in the vicinity of a razor notch, which reflects the uniform failure mode. One objective was to assess the phase compatibility in the composites.

2.6 Thermal properties

Thermal properties were tested by thermogravimetric analysis (TGA) (STA 6000, Perkin Elmer Inc., Norwalk, Connecticut, USA). A sample of approximately 20 mg was placed in a ceramic pan and then heated with a heating rate of 20°C/min, across the temperature range from 30°C to 1,000°C, under nitrogen atmosphere. The results show thermal characteristics and are related to aging.

2.7 Statistical analyses

The statistical analyses were performed using Duncan's test at 95% confidence level. ANOVA was used to assess significance of effects on the mechanical properties.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Eco-nanocomposite characteristics

The characteristics of eco-nanocomposite components are summarized in Table 1.

TABLE 1 Physical properties of eco-nanocomposite components

Component	Chemical structure	Density (gcm^{-3})	Function
Natural Rubber (NR)	$(\text{C}_5\text{H}_8)_n$	0.98	Backbone (secondary component)
Epoxidized NR (ENR 50)	$(\text{C}_5\text{H}_8\text{O})_n$	0.93	Modification natural rubber (secondary component)
Epoxy resin	$(\text{C}_{39}\text{H}_{45}\text{O}_7)_n$	1.15	Primary component
Polyamine	$(\text{C}_4\text{H}_{13}\text{N}_3)_n$	1.20	crosslinking agent (hardener)
Nanosilica	$(\text{SiO}_2)_n$	1.28-1.30	Filler (nanoparticle, reinforcing filler)

3.1.1 Fourier transform infrared spectroscopy analysis

Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) was used to determine the epoxide content in ENR (Figure 1 and Table 2), from the FT-IR spectra of representative NR and ENR samples

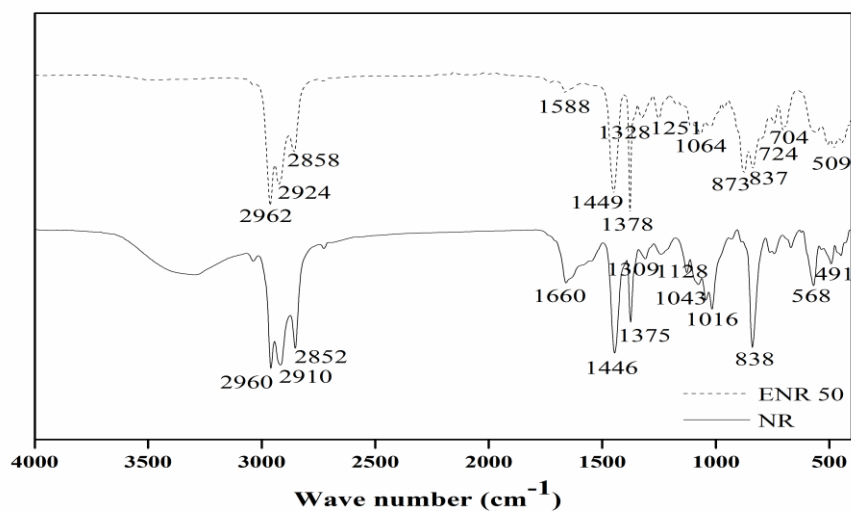


FIGURE 1 The FT-IR spectra of NR and a representative ENR 50

TABLE 2 Comparing the FT-IR spectra of NR and ENR 50

Functional	NR	ENR 50
C=C-H	838	837
-CH ₂ , -CH ₃	1446, 1375	1449, 1375
C=C	1660	1588
-CH ₂ , -CH ₃	2960, 2910, 2858	2962, 2924, 2858
C-O	-	873, 1251

The prepared ENR was characterized for its epoxidation (in mol %) using FT-IR. The characteristic peaks of NR (Figure 1) appeared at 2858, 1660, 1446, 1375 and 838 cm⁻¹, and were assigned to the C-H stretching, C=C stretching, CH₂- deformation, C-H deformation of CH₂ and =C-H deformation, respectively.^[29] As the C=C bonds in NR molecules were randomly converted into epoxide groups, new characteristic peaks emerged at 1251 and 873 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 cm⁻¹ increased correspondingly, and the reduction in the number of C=C in ENR was reflected by decreased peaks at 1660 and 838 cm⁻¹. This confirmed the formation of epoxide rings from the reaction with performic acid (generated in situ by reacting HCOOH and H₂O₂) of the C=C bonds on the NR backbones. The calculated mol % epoxidation in the prepared ENR was obtained from the characteristic FT-IR peaks (A) at 873 and 837 cm⁻¹ according to Eq.1.

$$\text{Mol \% epoxidation} = [A_{873}/(A_{873} + A_{837})] \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

The mol % epoxidation of ENR was approximately 50 mol %. It is known that, the ENR 50 with 50 mol % epoxidation usually has higher strain crystallization, resilience, and elasticity, but lower oil resistance than ENR with higher mol % epoxidation.^[29] Therefore, to balance these properties, ENR with medium mol % epoxidation (50 mol %) was prepared by using 0.5 M H₂O₂ and 0.75 M HCOOH in the latex stage. Accordingly, this ENR was labelled ENR 50 as in prior work.

3.1.2 Nuclear magnetic resonance analysis

One-dimensional nuclear magnetic resonance (NMR) analysis was performed to determine the chemical characteristics of the synthesized material. The ^1H -NMR spectrum of NR using CDCl_3 as the solvent was consistent with ENR 50 (Figures 2.(a) NR and (b) ENR 50). ^1H -NMR of NR showed three main peaks at 5.26, 2.06 and 1.68 ppm, which are characteristic of olefinic protons (HC -), methylene protons ($-\text{CH}_2$ -) and methyl protons ($-\text{CH}_3$), respectively (Figure 2.a). ^1H -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 2.b). These NMR results are in agreement with those previously reported for NR and ENR 50. [30-31]

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 [32], 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 content was estimated from the change in the double bonds of rubber ($I_{5.14}$) converted to epoxide ($I_{2.70}$) (Figure 2).

$$\text{Mol \% epoxidation} = [I_{2.70}/(I_{2.70} + I_{5.14})] \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Equation 2 gave an epoxide content estimate of 50.49 mol % in the prepared ENR 50, in good agreement with the estimate from FT-IR.

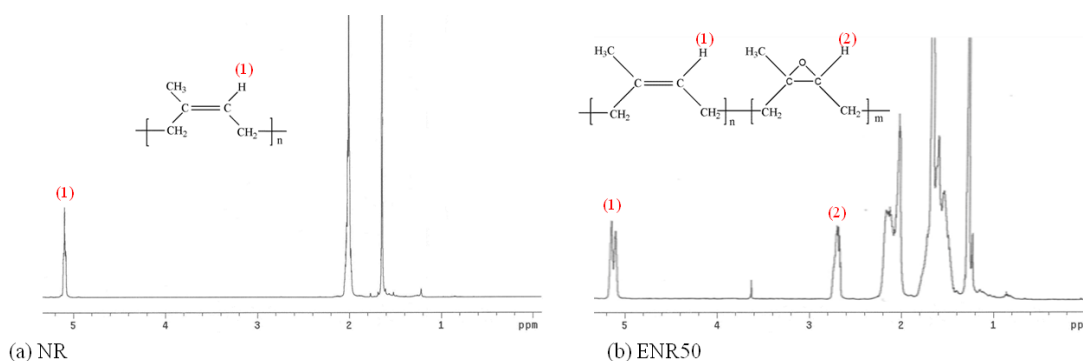


FIGURE 2 The ^1H -NMR to determine the chemical characteristics of (a) NR and (b) ENR 50

3.2 Optimizing ENR 50 content in the composite

To optimize the ENR 50 content in epoxy resin blends were tested with 3, 5, 7, and 10 phr including the baseline without ENR 50. The results show, the mechanical properties of epoxy resin blends with ENR 50 degraded with more than 3 phr ENR 50.

The ENR 50 content in the composite had significant effects. Also impact strength and fracture toughness of epoxy with added rubber phase were tested. It was found that, the impact strength could be improved by blending in ENR 50 and it was maximal at 3 phr ENR 50 content. However, tensile strength, tear strength, and hardness decreased steadily with rubber contents beyond 3 phr, suggesting reduced molecular mobility. In addition, hardness of the blends was commonly below that of the original epoxy resin composite as shown in Figures 3(a), and 3(b) Figures High impact strength is the main property required in a UAV propeller. Therefore further experiments in this study had the fixed 3 phr ENR 50 content.

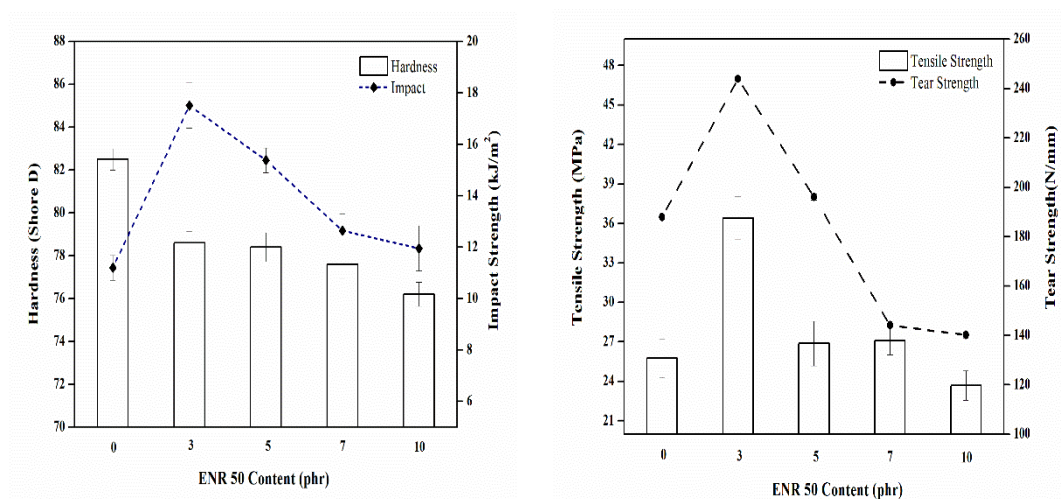


FIGURE 3 The mechanical properties of epoxy resin blend with ENR 50

Impact strength and hardness and (b) Tensile strength and tear strength

3.3 Optimizing the amount of nanosilica in the eco-nanocomposite

3.3.1 The nanosilica loading

To optimize the amount of nanosilica in the eco-nanocomposite with 3 phr ENR 50 (100 phr epoxy resin), several alternative (nanosilica loading 0-5 phr) contents of 40% nanosilica were used in the blends. The mechanical properties of eco-nanocomposites.

TABLE 3 The mechanical properties of eco-nanocomposites

Nanosilica (phr)	Tensile Strength (MPa)	Tear Strength (N/mm)	Hardness (Shore D)	Impact Strength (kJ/m ²)	Density (g/cm ³)
0	27.45 ± 0.34 ^e	233.90 ± 0.89 ^a	78.50 ± 0.54 ^b	11.45 ± 0.88 ^b	0.98 ± 0.01 ^b
1	40.43 ± 0.47 ^a	225.00 ± 1.68 ^b	78.60 ± 0.03 ^b	10.02 ± 0.82 ^e	1.02 ± 0.02 ^a
2	33.85 ± 0.14 ^b	210.33 ± 1.57 ^c	79.80 ± 0.83 ^a	15.16 ± 0.45 ^d	1.05 ± 0.01 ^a
3	30.50 ± 0.94 ^c	185.67 ± 1.86 ^d	80.10 ± 0.71 ^a	20.58 ± 1.03 ^a	1.09 ± 0.02 ^a
4	28.43 ± 0.92 ^d	154.15 ± 1.87 ^e	81.00 ± 0.53 ^a	14.25 ± 1.18 ^c	1.11 ± 0.02 ^a
5	27.57 ± 0.92 ^e	137.85 ± 0.80 ^f	81.40 ± 0.49 ^a	9.50 ± 1.06 ^e	1.14 ± 0.01 ^a

The mechanical properties assessed were impact strength, tensile strength, tear strength and hardness. The effects of nanosilica content on the mechanical properties are shown in Table 3 and Figure 4. Plus, Figures 5 and 7 shows the morphologies assessed by SEM. Figures 6 and Table 4 shows the thermal properties by TGA, respectively.

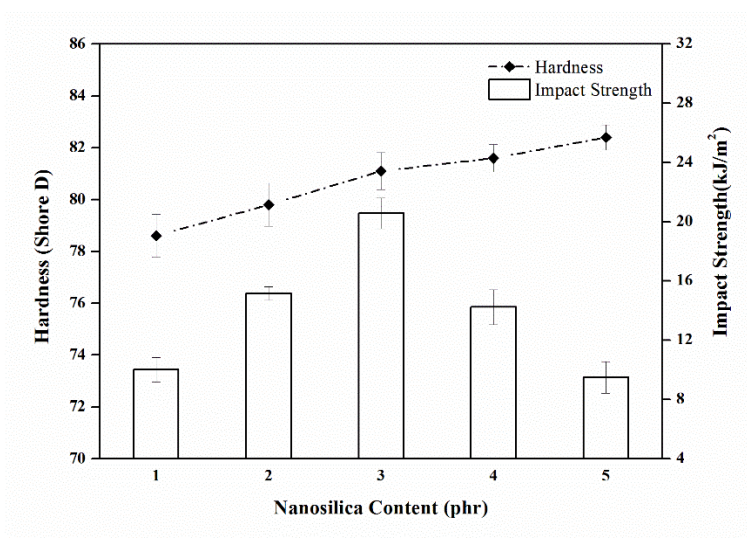


FIGURE 4 The impact strength and hardness of eco-nanocomposites at various nanosilica loadings

The blends with nanosilica and ENR 50 gave significantly improved mechanical properties, and the nanosilica content had significant effects. It was found that the impact strength of eco-nanocomposites could be improved by blending nanosilica and it was maximal at 3 phr nanosilica content. However, the rubber phase increased the viscosity of the epoxy resin mixture, and reduced crosslink density and tensile strength. The high reinforcing efficiency of layered nanosilica in rubber nanocomposites, even at low nanosilica loadings, is largely due to good nanoscale dispersion. In impact strength tests the eco-nanocomposite specimens were attached to a notched Izod. The amount of energy absorbed in the test depends on the energy required to cause fracture, and the impact resistance is displayed in Figure 4. It is seen that 3 phr nanosilica content gave the highest impact resistance. This improvement might be due to the rubber dispersed in epoxy resin absorbing energy, but its phase interfaces with epoxy resin are weak. Table 3 and Figure 4 indicate that the hardness progressively increases with increasing nanosilica loading. This is due to higher number of epoxy molecule was hindered by nanosilica, while make final sample tend to be harder correspond to the increase in density and hardness when nanosilica content is increasing. This loss of rubber elasticity reduced resistance to tearing consistently with nanosilica loading, while the reinforcing filler nanoparticles (nanosilica) increased hardness. The hardnesses of nanosilica loaded composites was not significantly different from the baseline case (around 78-80 shore D in all cases).

The tear resistance and tensile strength decreased with nanosilica filler loading, because the rubber phase increases the viscosity of the epoxy resin mixture and reduces crosslink density: causing loss of tensile strength and rubber elasticity and reducing resistance to tearing, consistently with silica loading (Table 3).

3.4 Morphology

The SEM micrographs of epoxy resin composite with various amounts of ENR 50

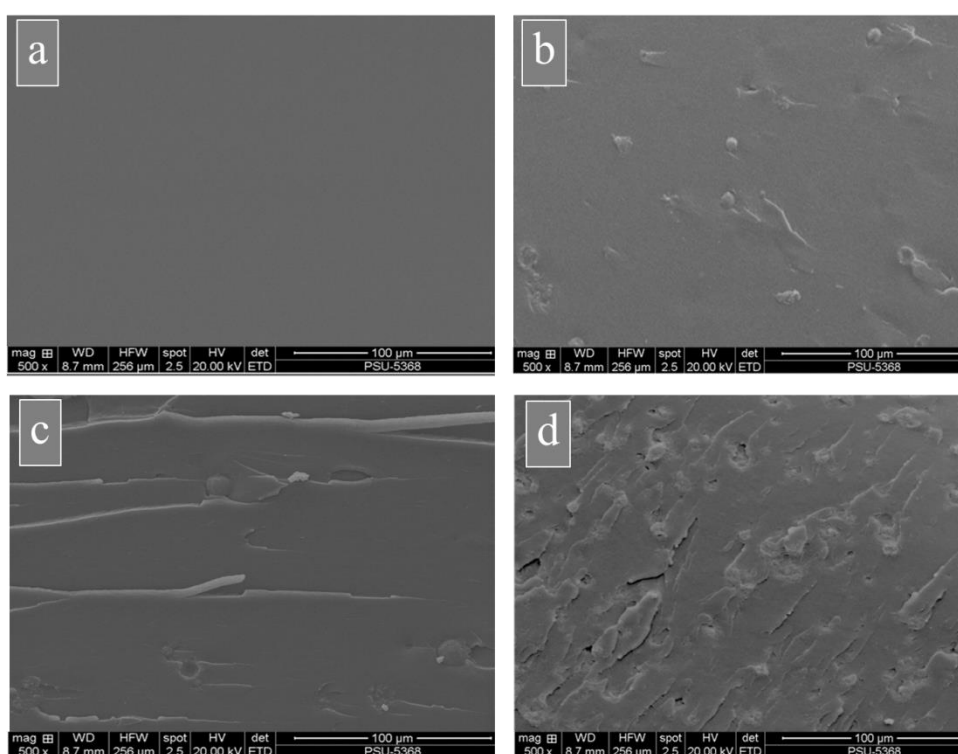


FIGURE 5 SEM micrographs of fracture surfaces of epoxy resin composites with ENR 50 various amounts; (a) without ENR 50, (b) 3 phr ENR 50, (c) 5 phr ENR 50, and (d) 7 phr ENR 50

SEM fracture surfaces of the pure epoxy resin and of epoxy resins with various amounts (3, 5, and 7 phr) of ENR 50 are shown Figure 5. The rubber and epoxy resin interfacial interactions are improved in the case of ENR 50. SEM micrographs show that as the amount of epoxide groups increased, the interfacial adhesion between rubber and epoxy resin improved. Drastic decrease in microstructure size, in the case of epoxy blended with ENR 50, was

presumably due to stronger interfacial bonding as well as shorter rubber molecular chains. Consequently, good distribution of the small globular rubber nodules was achieved. However, the rigidity of epoxide groups was caused low-strain crystallization in the ENR 50. The rubber particles were visible on the surfaces and the larger ENR 50 amount gave slightly bigger particles. The bigger rubber particles at more than 3 phr are associated with poorer mechanical properties of the composite, which were indeed observed. The ENR 50 content as 3 phr appears near optimal for properties and was used in further experiments

The SEM micrographs of eco-nanocomposites with difference amounts of nanosilica.

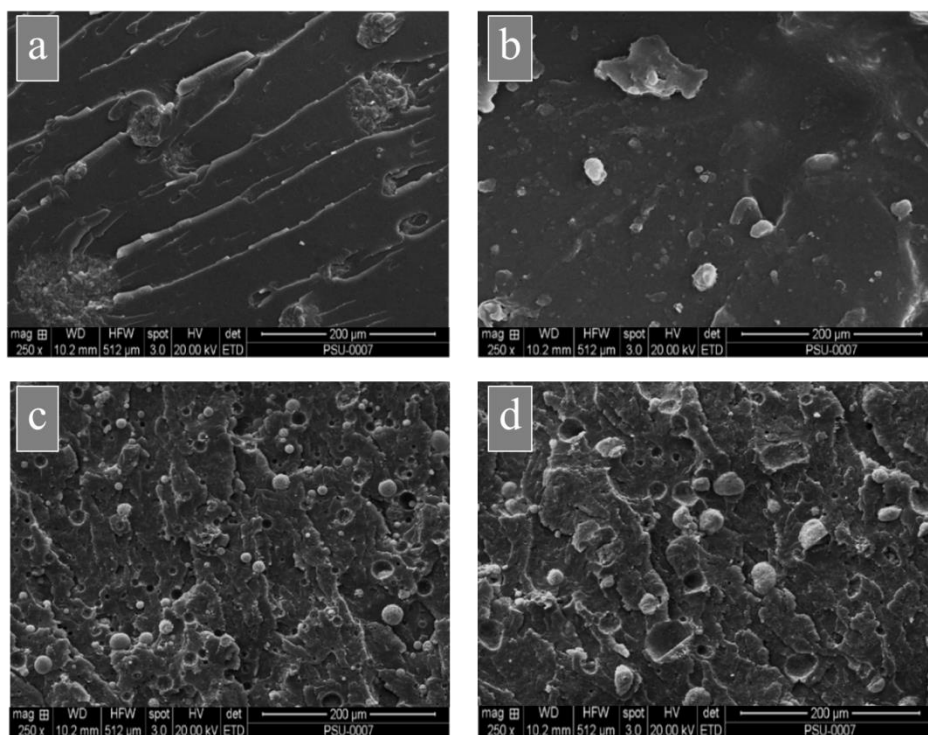


FIGURE 6 SEM micrographs of fracture surfaces on eco-nanocomposites of epoxy resin with 3 phr ENR 50 and various amounts of nanosilica (0, 1, 3, and 5 phr); by (a) without nanosilica, (b) 1 phr nanosilica, (c) 3 phr nanosilica, (d) 5 phr nanosilica

Figure 6 showing the morphologies of eco-nanocomposites of 100 phr epoxy resin blended with 3 phr ENR 50 and various nanosilica amounts of 1, 3, and 5 phr are controlled with the pure composite. The average size of the nanosilica particles is about 20 nm. The dispersion of nanosilica was observed with a field emission scanning electron microscope. The

interfacial interactions of rubber and epoxy resin are improved in the case of ENR, because hydrogen bonds form between the nanosilica and the polymer matrix (-Si-O..H-O-), in which oxygen connected to silicon atom provides a shared pair electrons. A consequence the absorption band of hydroxyl group appears at a lower frequency in the composites with nanosilica. SEM micrographs of the fracture surfaces suggest that the toughening of epoxy resin composite was induced by the ENR 50 globular nodules attached to the epoxy matrix and improving the impact strength. The rubber and epoxy resin interfacial interactions are improved in the case of ENR 50. SEM micrographs show that as the amount of epoxide groups increased the interfacial adhesion between rubber and epoxy resin improved. Drastic decrease in microstructure size, in the case of epoxy blended with ENR 50, was presumably due to stronger interfacial bonding as well as shorter rubber molecular chains. Consequently, good distribution of small globular nodules was achieved; however, the rigidity of epoxide groups caused low strain crystallization in the ENR 50.

3.5 Thermal behavior

Thermogravimetric analysis (TGA) mainly informs about thermal degradation. The TGA scans of eco-nanocomposites are shown in Figure 7 and Table 4.

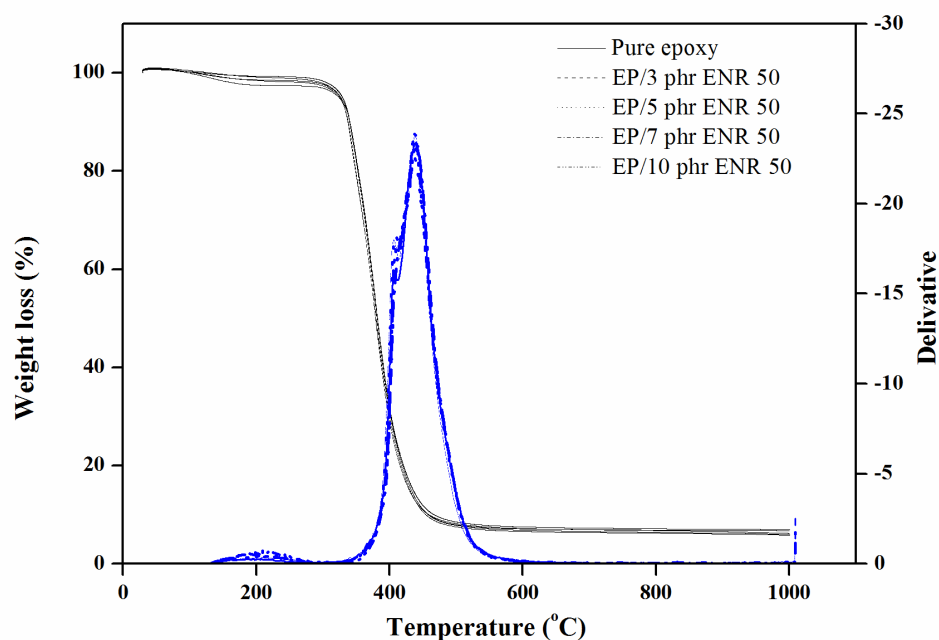


FIGURE 7 Effect of thermal degradation on remaining sample weight

TABLE 4 The temperatures for 0.5 and 1% wt losses by degradation, and ash content

ENR 50 (phr)	T0.5 % wt	T1 % wt	Ash content (%)
0	275.62	162.64	0.218
3	226.79	163.41	0.793
5	156.49	132.66	0.542
7	153.87	128.59	0.628
10	129.61	115.20	0.229

TGA was performed to evaluate the thermal stability of ENR 50 and its composites. The TGA curves of the samples are shown in Figure 7. The temperature onset ($T_{0.5}$) and temperature final (T_1) were obtained. First the thermal behavior of the ENR 50 component by itself was observed. The TGA curve shows that weight loss starts at 210°C and ends at 446°C and also shows the peak weight loss rate at 254°C. The results indicate that, the interactions in composites did not change the degradation mechanisms of ENR 50. It has been shown that, the addition of ENR 50 into the composites results in less degradation at all temperatures, compared to pure epoxy resin. The rubber added to epoxy resin is dispersed as small particles in the epoxy resin matrix, disrupting interaction within the epoxy resin matrix. It was found that, the decomposition temperature of the composites tended to decrease with ENR 50 content, because the ENR 50 formed larger particles with poorer interactions with the epoxy resin phase. Composites containing 3 phr ENR 50 had good particle dispersion and the highest T_1 , corresponding to the best mechanical properties with 3 phr ENR 50 that was observed earlier.

3.6 Application to UAV propeller blades

The eco-nanocomposites prepared from epoxy resin (EP) blended with ENR 50 and nanosilica nanoparticles had improved impact strength, required in UAV propeller blades applications. UAV blade from pure epoxy resin is here used as baseline reference. Top views of the UAV blades from experimental composites are shown in Figure 8. The blends were

successfully cured in silicone casting molds. The eco-nanocomposites was 100 phr epoxy resin/3 phr ENR 50/nanosilica 3 phr has good appearance.

3.6.1 UAV propeller blades produced

The UAV propeller blades formed were cured specimens appeared brownish fair-haired in color as shown in Figure 8.



FIGURE 8 Top views of the UAV blades produced from eco-nanocomposites of epoxy resin with 3 phr ENR 50 and various nanosilica amounts (0, 1, 2, 3 and 4 phr); by (a) without nanosilica, (b) 1 phr nanosilica, (c) 2 phr nanosilica, (d) 3 phr nanosilica, and (e) 4 phr nanosilica

The blended epoxy resin specimens had smooth, irregular and cloudier appearance than epoxy resin with added nanosilica. The surface appearance of UAV blades from epoxy resin was improved by blending in ENR 50 and it was the best appearance at 3 phr nanosilica content. However, with more than 3 phr the UAV blades became non-smooth and irregular.

3.6.2 Properties of the UAV propeller blades

The important mechanical properties for UAV propeller blades were determined; impact strength, hardness and flexural strength. These are shown in Table 5.

TABLE 5 The mechanical properties of eco-nanocomposites for UAV propellers blades

Nanosilica (phr)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (%)	Hardness (barcol)
0	65.95±7.69 ^c	486.33±11.26 ^b	94.00±0.81 ^a
1	67.93±2.28 ^c	372.66±16.92 ^c	94.10±0.75 ^a
2	72.49±8.01 ^b	451.66±19.97 ^b	93.80±1.29 ^a
3	79.43±9.79 ^a	539.66±17.47 ^a	95.90±1.41 ^a

^{a, b, c} Different superscripts within a column indicate statistically significant differences at 95% confidence by Duncan's method. Mean ± SD: mean and standard deviation based on triplicate samples

The UAV propeller blades formed with carbon fibers were coated with the eco-nanocomposites. The mechanical properties of the UAV propeller blades were not significantly affected. Since rubber is highly flexible in the eco-nanocomposites UAV propeller blades, it improved both impact and flexural strengths, while hardness was not changed from the original.

4. CONCLUSIONS

Eco-nanocomposites were proposed in this research as suitable for UAV propeller applications. The results show optimal ENR 50 content of the eco-nanocomposite was 3 phr. The eco-nanocomposite (epoxy resin/3 phr ENR 50/ 3 phr nanosilica) had improved impact and tensile strengths. The impact strength was improved by 20.4% at 3 phr nanosilica loading by weight relative to epoxy resin. The tear strength of the eco-nanocomposite was slightly decreased by the nanofiller increased. The SEM image relate to mechanical properties by confirmed that crazing, microcracks and debonding of nanoparticles from the matrix were the main mechanisms improving fracture toughness. Experimentally, the epoxy resin containing ENR 50 and nanosilica particles had improved impact strength required by unmanned aerial vehicles, propeller blade

applications. The eco-friendly composites proposed in this research have suitable characteristics for UAV applications. The ENR 50 and nanosilica contents influenced the processing thermal and mechanical properties of the eco-nanocomposite. The rheological properties of these materials indicate that they are suitable for UAV propeller applications.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand, Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Gistda), Research and Researcher for Industry Program and Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Thailand for financial support. We are also grateful to Assoc. Prof. Seppo Karrila of the Prince of Songkla University for assistance with manuscript preparation.

REFERENCES

- [1] V. Jaiganesh, S. Manivannan, S. Manivannan, *Procedia Engineering*. 2014, 97, 1079-1088.
- [2] B. M. Madhusudhan, P.V. Srihari, *Engineering Research and Applications ISSN*. 2014, 4, 2248-9622.
- [3] D. Kontnarowska, *Progress in Organic Coatings*. 1999, 37, 149-159.
- [4] S. Jana, W. H. Zhong, *Appl Polym Sci*. 2007, 106, 3555-3563.
- [5] S. G. Hong, C. K. Chan, *Thermochimica Acta*. 2004, 417, 99-106.
- [6] P. Kelly, *Durability*, Cambridge, UK, Woodhead. 1999, 282-293.
- [7] E. Butta, G. Levita, A. Marchetti, A. Lazzeri, *Polym Eng Sci*. 1986, 6373.
- [8] A. B. B. Saleh, Z. A. M. Ishak, A. S. Hashim, W. A. Kamil, U. S. Ishiaku, *Physics Procedia*. 2014, 55, 129-137.
- [9] N. Pithaksareetham, S. Suchat, *The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7)*, June 1st - 2nd. Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand. 2017, 144-149.
- [10] P. Bussi, H. Ishida, *Polymer Scienc*. 1994, 53, 441-454.
- [11] S. Chuayjuljit, N. Soatthiyanon, P. Potiyaraj, *Polym Sci*. 2006, 102, 452-459.
- [12] F. Liu, Z. B. Zhang, L. L. Xu, M. S. Tang, *Advanced Materials Research*. 2011, 812- 816.
- [13] M. H. Irfan, *Netherlands*. 1998.

- [14] A. P. Kharitonov, G. V. Simbirtseva, A. G. Tkachev, A. N. Blohin, T. P. Dyachkova, A. A; Maksimkin, D. I. Chukov, *Composites Science and Technology*. 2015, 107, 162- 168.
- [15] T. Lan, P. D. Kaviratna, T. J. Pinnavaia, *Chemistry of Materials*. 1995, 7, 2144-2150.
- [16] Z. Peng, L. X. Kong, S.-D. Li, Y. Chen, M. F. Huang, *Composites Science and Technology*. 2007, 67, 3130-3139.
- [17] Y. Ikeda, Y. Kameda, *Sol-Gel Science and Technology*. 2004, 31, 137-142.
- [18] S. Kohjiya, Y. Ikeda, *Sol-Gel Science and Technology*. 2003, 26, 495-498.
- [19] M. Battistella, A. M. Cascione, B. Fiedler, M. H. G. Wichmann, M. Quaresimin, K. Schulte, *Composites*. 2008, 39, 1851-1858.
- [20] Y. Chen, Z. Peng, L. X. Kong, M. F. Huang, P. W. Li, *Polymer Engineering & Science*. 2008, 8, 1674-1677.
- [21] Y. Ikeda, S. Kohjiya, *Polymer*. 1997, 38, 4417-4423.
- [22] G. Ragosta, M. Addateo, P. Musto, G. Scarinza, L. Mascia, *Polymer*. 2005, 46, 10506-10516.
- [23] M. H. Kothmann, R. Zeiler, A. R. d. Anda, A. Brückner, V. Altstadt, *Polymer*. 2015, 60, 157-163.
- [24] P. Sae-Oui, C. Sirisinha, K. Hatthapanit, U. Thepsuwan, *Polymer Testing*. 2005, 24, 439-446.
- [25] S. Suchat, W. Yingprasert, *Advanced Materials Research*. 2014, 844, 182-185.
- [26] D. Yuexin, T. Zhaoyuan, Z. Yan, S. Jing, *Chinese Journal of Aeronautics*. 2008, 21, 370-377.
- [27] D.R. Burfield, K.L. Lim, K.S. Law, K Sanglaw, *Polymer*. 1984, 25, 995-998.
- [28] T. Saito, W. Klinklai, S. Kawahara, *Polymer*. 2007, 48, 750-757.
- [29] Y. Yeomin, M. Richard, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2005, 277, 107-110.
- [30] S. Pongsathit, C. Pattamaprom, *Radiation Physics and Chemistry*. 2017, 14.
- [31] O. S. Dahham, R. Hamzah, M. A. Bakar, N. N. Zulkepli, S. S. Dahham, S. S. Ting, *Polymer Testing*. 2017, 59, 55-66.
- [32] A. Thitithammawong, S. Srangkhum, A. Rungvichaniwat, *Journal of Rubber Research*. 2011, 14, 230-240

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล

นายณัฐพล พิทักษ์เสรีธรรม

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5740320202

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

สถาบันศึกษา

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2557

(การจัดการอุตสาหกรรมยาง)

ทุนการศึกษา

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ประจำปี 2559 ที่สนับสนุนค่าธรรมการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่เน้นการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปี 2560 ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2559 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Nattapon Pithaksareetham¹ and Sunisa Suchat¹. Improving the Impact Strength of Epoxy Resin for UAV Propeller Applications with Epoxidized Natural Rubber. The international polymer conference of Thailand (PCT-7). Amari Watergate Hotel, Bangkok Thailand 1-2 June, 2017
2. Nattapon Pithaksareetham¹, Chainuson Kasagepongsarn², Priwan Pongwan³, Montri Suklueng³ and Sunisa Suchat¹. Improvement of the mechanical properties of epoxy resin composites with ENR 50 for use in wind turbinepropeller. APRC 2017 Rubber conference .Prince of Songkla University, Surat Thani Campus. 16-17 November 2017
3. Nattapon Pithaksareetham¹ | Natthawat Hongkarnjanakul² | Sunisa Suchat¹. Eco-nanocomposites with epoxidized natural rubber for improved mechanical properties essential to unmanned aerial vehicles propeller applications. Advances in Polymer Technology (2018)

