

การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุประกอบเรซิน
และเส้นใยกัญชงสำหรับการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน
THE STUDY ON INCREASING STRENGTH OF RESIN COMPOSITE
AND HEMP FIBER FOR BULLETPROOF VEST PLATES



นายธณัฏ วัตรจิตติ
นางสาวธนพร ทองสีนุช
นางสาวนิศารัตน์ เกิดมณี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุประกอบเรซิน
และเส้นใยแก้วสำหรับการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน



นายธนัท วัตรจิตติ
นางสาวธนพร ทองสินุช
นางสาวนิศารัตน์ เกติมณี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY ON INCREASING STRENGTH OF RESIN COMPOSITE
AND HEMP FIBER FOR BULLETPROOF VEST PLATES



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR BACHELOR OF ENGINEERING PROGRAM IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

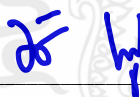
ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุประกอบเรซินและเส้นใย กัญชงสำหรับการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน		
โดย	นายธณัท	วัตรจิตติ	รหัสนักศึกษา 63010387
	นางสาวธนพร	ทองสีนุช	รหัสนักศึกษา 63010412
	นางสาวนิศารัตน์	เกิดมณี	รหัสนักศึกษา 63010534
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภู ศรีสืบสาย		
ปริญญานิพนธ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี


คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์)



กรรมการ
(ดร. นริศรา ทองบุญชู)



กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สันติ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุประกอบเรซินและเส้นใย กัญชงสำหรับการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน		
โดย	นายธณัท	วัตรจิตติ	รหัสนักศึกษา 63010387
	นางสาวธนพร	ทองสินุช	รหัสนักศึกษา 63010412
	นางสาวนิศารัตน์	เกิดมณี	รหัสนักศึกษา 63010534
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิญู ศรีสืบสาย		

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นส่วนหนึ่งของเสื้อเกราะที่มีหน้าที่ในการดูดซับพลังงานที่เกิดจากแรงกระแทกเพื่อลดความเร็วของกระสุน ซึ่งผลิตมาจากวัสดุที่ทำด้วยเหล็ก และใยสังเคราะห์ ถึงแม้ว่าวัสดุเหล่านี้มีความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเหล่านี้มีต้นทุนในการผลิตที่สูง จากการศึกษาพบว่าเส้นใยกัญชงเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรง และเหนียว เหมาะแก่การนำมาผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนทดแทนการใช้เส้นใยสังเคราะห์ นำมาซึ่งการทดลองนี้ โดยขั้นตอนการทดลองนี้ใช้เส้นใยกัญชงที่นำมาปั่นเป็นด้ายและนำไปทอ 3 รูปแบบ ได้แก่ Plain, Basket และ Herringbone หลังจากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใย ด้วยวิธีการใช้สารเคมี EDTA เพื่อกำจัดส่วนประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกจากเส้นใย เนื่องจากทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง โดยทำการทดลองศึกษาผลจากลายของผ้าทอ 3 รูปแบบและจำนวนการซ้อนทับกันของผ้าเส้นใย ได้แก่ ลายธรรมดา 1-3 ชั้น, ลายตะกร้า 1-3 ชั้น และลายก้างปลา 1-3 ชั้น จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการแวกคัม อินพีวชัน โดยนำผ้าเส้นใยมาแวกคัมพร้อมกับเมทริกซ์โดยผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซิน (Part A) กับสารเพิ่มความแข็งแรง (Part B) ในอัตราส่วน 100 : 35 ปล่อยให้ส่วนผสมไหลผ่านเส้นใยและทิ้งไว้เพื่อให้เรซินกระจายตัวและแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยอย่างทั่วถึง หลังจากขึ้นรูปเป็นเป็นวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงแล้วนั้นจึงนำไปทดสอบหาค่าความต้านแรงดึง (Tensile Test) และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Test) หลังจากทดสอบและนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ พบว่า ผ้าทอลายตะกร้ามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ตามด้วยลายก้างปลาและลายธรรมดาตามลำดับ และผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันของเส้นใยจำนวน 3 ชั้นมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดตามด้วย 2 ชั้นและ 1 ชั้นตามลำดับ ในขณะที่ผ้าทอลายตะกร้าสำหรับในกรณีที่มีการซ้อนทับกันของผ้าทอจำนวน 1 และ 3 ชั้น จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด ตามมาด้วยลายก้างปลาและลายธรรมดา ในขณะที่ผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันจำนวน 2 ชั้น ลายก้างปลาจะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าลายตะกร้า และลายธรรมดา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	The Study on Increasing Strength of Resin Composite and Hemp Fiber for Bulletproof Vest Plates	
By	Thanut Watjitti	Student ID 63010387
	Thanaphon Thongsinut	Student ID 63010412
	Nisarath Kertmanee	Student ID 63010534
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Chemical Engineering	
Year	2023	
Main Advisor	Associate Professor Kunlanan Kiatkittipong, Ph.D.	
Co-Advisor	Assistant Professor Wipoo Sriseubsai, Ph.D.	

ABSTRACT

Bulletproof plates are generally a part of bulletproof vest that is responsible for absorbing the energy generated by an impact to reduce the speed of the bullet. They are made from materials made of steel and synthetic fibers. Although these materials are strong and durable, these materials have a high production costs. Studies have shown that hemp fiber is a natural fiber that is strong and tough, suitable for producing bulletproof plates instead of synthetic fibers. This led to this this experimental by first uses hemp fibers that are spun into thread and woven into three pattern: Plain, Basket, and Herringbone. After that, they are put through a pretreatment process which EDTA is used to remove non-cellulosic components from the fibers which will decreases the strength. An experiment was conducted to study the effect of 3 types of woven patterns and the number of overlapping fabric fibers: 1-3 layers of plain, 1-3 layers of basket, and 1-3 layers of herringbone pattern. Then it is put through a vacuum infusion process whereby the fiber fabric is vacuumed along with a matrix by mixing epoxy resin with a hardener in a ratio of 100 : 35. After that, let the mixture flow through the molds and spread into the fibers thoroughly. After formed into a composite material reinforced with hemp fibers, it is then tested for tensile and impact strength. It was found that basket pattern had the highest tensile strength followed by herringbone and plain pattern respectively. A woven fabrics with overlapping fibers of 3 layers had the highest tensile strength, followed by 2 layers and 1 layer, respectively. A basket pattern in cases of 1 and 3 overlapping layers of fabric will have the highest impact strength followed by herringbone pattern and plain pattern. While woven fabrics with two overlapping layers, the herringbone pattern has a higher impact strength than the basket and the plain pattern, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำตลอดจนการให้คำปรึกษาทางวิชาการและแนวทางการแก้ไขปัญหาให้ลุล่วงด้วยดีจาก รศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และพี่นักเทคนิคทุกคนที่ช่วยให้ความรู้และคำแนะนำในเรื่องทฤษฎีและการปฏิบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องวิธีการใช้เครื่องมือหรือเครื่องทดสอบต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อีกทั้งยังคอยให้คำแนะนำและคำชี้แนะในการแก้ไขปัญหาต่างๆ

ขอขอบพระคุณเพื่อนที่ร่วมกันทำปริญญานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และเพื่อนในห้องปฏิบัติการที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการทดลอง รวมทั้งเพื่อนสาขาวิศวกรรมเคมีที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณคุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี และคุณกัณธ สุขพิมาย เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้ รวมถึงบิดา มารดา ญาติในครอบครัวอันเป็นที่รักและเคารพยิ่งที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจ และให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง หากมีข้อผิดพลาดประการใดในงานวิจัยนี้ คณะผู้จัดทำขอน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้

นาย ธนัท วัตรจิตติ

นางสาว ธนพร ทองสีนุช

นางสาว นิสารัตน์ เกิดมณี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ และความมุ่งหมายของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตการศึกษาและการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เสื้อเกราะ.....	3
2.2 มาตรฐานการทดสอบ NIJ	3
2.3 เส้นใยธรรมชาติ.....	5
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมี	5
2.3.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ	5
2.4 กัญชง.....	6
2.4.1 ลักษณะการทอเส้นใย	6
2.4.1.1 การทอผ้าหรือป้ายทอแบบลายธรรมดา (Plain Weave).....	6
2.4.1.2 การทอผ้าแบบลายตะกร้า (Basket Weave).....	6
2.4.1.3 การทอผ้าแบบลายก้างปลา (Herringbone Weave)	7
.....	7
2.5 การปรับสภาพเส้นใย (Fiber Pretreatment).....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 วัสดุคอมโพสิต หรือวัสดุผสม (Composite Materials).....	7
2.6.1 วัสดุเนื้อพื้น (Matrix Phase Material)	8
2.6.1.1 เทอร์มอเซต (Thermoset).....	8
2.6.1.2 เทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic)	8
2.6.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement Material)	9
2.7 เรซิน และสารเพิ่มความแข็งแรง.....	10
2.7.1 Epoxy EPOTEC YD 535LV และ Hardener TH7253	10
2.8 การแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion).....	11
2.9 การทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test).....	11
2.9.1 มาตรฐาน ASTM D3039 การทดสอบแรงดึงของพอลิเมอร์และคอมโพสิต	13
2.9.2 มาตรฐาน ASTM D5034 การทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวของผ้าหรือสิ่งทอ.....	13
2.10 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test).....	14
2.10.1 มาตรฐาน ASTM D256 สำหรับกำหนดแรงกระแทกลูกตุ้มไอซอดของพลาสติก (Izod Notched Impact Test on Plastics).....	15
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews).....	16
2.11.1 พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติ (T. O. Azeez 1, and O. D. Onukwuli (2018))	16
2.11.2 ผลของการกำจัดเพกตินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยกล้วย และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (M. Liu et al. / Composites: Part A 90 (2016)).....	17
2.11.3 การทดสอบแรงดึงของเส้นใย CISSUS POPULNEA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย EDTA	17
2.11.4 ไยแก้ว/ท่อนาโนคาร์บอน/คอมโพสิตอีพ็อกซีไฮบริด: ให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Saman Dehrooyeh, Majid Vaseghi, Majid Sohrabian, Mahmood Sameezadeh (2021)).....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	20
3.1 การดำเนินการเตรียมเส้นใย (Fiber Pretreatment)	20
3.1.1 สารเคมี.....	20
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์	20
3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง	20
3.2 การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยด้วยวิธีการแวคคัม อินฟิวชัน (Forming of Hemp Fiber-Reinforced Composites Materials by Vacuum Infusion)	21
3.2.1 สารเคมี.....	21
3.2.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	21

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง	21
3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test).....	22
3.3.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์	22
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	23
3.4 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Test).....	23
3.4.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	23
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	24
4.1 ตารางแสดงผลการทดลอง	24
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength).....	25
4.2.1.1 การวิเคราะห์ผลของการทดสอบความต้านทานแรงดึงของผ้าทอเส้นใยกล้วยระหว่างกรณีที่ไม่มีการปรับสภาพเส้นใยด้วย EDTA และกรณีที่มีการปรับสภาพเส้นใยด้วย EDTA.....	25
4.2.1.2 การวิเคราะห์ผลของการทดสอบความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตแต่ละรูปแบบการทอของเส้นใย และจำนวนชั้นของผ้าทอที่แตกต่างกันที่ผ่านการแควดคัมด้วยอีพ็อกซี่ เรซิน	26
4.2.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength).....	27
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
เอกสารอ้างอิง.....	32
ภาคผนวก ก.....	36
ภาคผนวก ข.....	40
ภาคผนวก ค.....	43
ภาคผนวก ง.....	46

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน NIJ แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะ[3].....	4
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของกำมะถัน[27]	6
ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของส่วนประกอบ[24]	10
ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของการผสมและการบ่มทางเคมี[24].....	10
ตารางที่ 2.5 ผลของรูปแบบการทอ และจำนวนชั้น (จำนวนการซ้อนกันของผืนผ้าทอ) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล[33].....	16
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย และคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ปรับปรุงประสิทธิภาพ ค่าจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย[34]	17
ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตระหว่าง CNT กับอีพ็อกซีเรซินที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของ CNT แตกต่างกันเทียบกับอีพ็อกซีเรซินที่ไม่ได้เติม CNT[36].....	18
ตารางที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลในคอมโพสิตระหว่าง CNT กับอีพ็อกซีเรซินเทียบกับอีพ็อกซีเรซินที่ไม่ได้เติม CNT[36].....	19
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและค่าต้านทานต่อแรงกระแทกสำหรับตัวอย่างชิ้นงานในแต่ละกรณีที่ทำการศึกษา.....	24

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเส้นใยกระดาษ[2]	3
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด[11]	5
รูปที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ[12]	5
รูปที่ 2.4 รูปแบบการทอเส้นใย (ก) Plain Weave (ข) Basket Weave (ค) Herringbone Weave[21]	7
รูปที่ 2.5 ประเภทของวัสดุผสม[25]	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอีพ็อกซี[26]	10
รูปที่ 2.7 กระบวนการเวคคัม อินฟิวชั่น[27]	11
รูปที่ 2.8 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039[29]	13
รูปที่ 2.9 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก[31]	14
รูปที่ 2.10 รอยบากของชิ้นงานทดสอบ[32]	15
รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ASTM D256[32]	16
รูปที่ 2.12 ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย C.populnea ที่ปรับสภาพด้วย EDTA[35]	17
รูปที่ 2.13 โมดูลัสแรงดึงของเส้นใย C.populnea ที่ปรับสภาพด้วย EDTA[35]	18
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Tester)	22
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester)	23
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงจากผลของการปรับสภาพด้วย EDTA	25
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงจากผลของรูปแบบการทอของเส้นใยและจำนวนชั้นของผ้าทอ	26
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกจากผลของรูปแบบการทอของเส้นใยและจำนวนชั้นของผ้า ทอ	27

รายการสัญลักษณ์ และคำย่อ

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษ

A	พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ (cm^2)
A	พื้นที่หน้าตัดรับแรง (m^2)
A_0	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (cm^2)
C_E	อัตราส่วนพลังงานกระแทกต่อความหนาของชิ้นงาน 6.7 J/mm [1500 in.-lbf/in]
E	พลังงานศักย์ของลูกตุ้มกระแทกก่อนตก (J, in.-lbf)
F	แรง (N)
F	แรงการดึงในทางเดียวเฉลี่ย (N)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2
H	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (mm, in.)
H	ระยะความสูงของลูกตุ้มตกกระทบ (inch)
H	ระยะความสูงของลูกตุ้มตกกระทบ (m)
l	ความยาวปกติของวัสดุ (m)
m_d	มวลของลูกตุ้มสำหรับการคำนวณความสูงการตกกระทบ (kg)
m_{dlbm}	มวลของลูกตุ้มกระทบในแรงโน้มถ่วงมาตรฐาน (lbm)
P_i	แรงดึงที่จุดสูงสุด (kg)
x	ส่วนที่ยืดออกของวัสดุ (m)

สัญลักษณ์ภาษากรีก

σ_i	แรงดึงที่จุดสูงสุด (kg/cm^2)
σ	แรงเค้น (psi)
λ	ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (psi)

คำย่อ

ASTM	เป็นสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (American Society for Testing and Materials)
CBD	สารที่ไม่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท (Cannabidiol)
EDTA	กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอซีติก (Ethylenediaminetetraacetic Acid)
FMJ	กระสุนหัวบอลหรือหัวเคลือบเปลือกแข็ง (Full Metal Jacketed)
FMJ RN	หัวกระสุนแกนตะกั่วหุ้มโลหะแข็งรูปทรงมนกลม (Full Metal Jacketed Round Nose)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FN	หัวกระสุนตัดปลายเพื่อการแข่งขันยิงเป้า (Flat Nose)
JSP	กระสุนหัวอ่อนฐานเคลือบเปลือกแข็ง (Jacketed Soft Point)
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)
NIJ	สถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice)
Pbw	Part by Weight
pH	ค่าความเป็นกรดต่าง (Potential of Hydrogen)
SJHP	หัวกระสุนกึ่ง Jacket (Semi Jacketed Hollow Point)
THC	เป็นสารที่มีฤทธิ์ต่อจิตประสาท (Tetrahydrocannabinol)
CNTs	ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes)
SWCNTs	ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes)
MWCNTs	ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ในอดีตมนุษย์นำวัสดุหลากหลายมาทำเป็นเสื้อเกราะเพื่อใช้ป้องกันตัวเองจากอันตรายเมื่ออยู่ในสภาวะสงครามหรือสถานการณ์ที่เสี่ยง ในยุคเริ่มแรก ชุดเกราะและโล่ถูกทำขึ้นจากหนังสัตว์ จากนั้นพัฒนาเป็นเกราะไม้และเกราะโลหะ ต่อมาสมัยสงครามครั้งที่ 2 ได้พัฒนาเสื้อเกราะรู้จักกันในชื่อ “แฟลค แจ็กเกต” (Flak Jacket) ผลิตขึ้นจากไนลอนสามารถกันสะเก็ดระเบิด แต่มีขนาดใหญ่และใช้ได้แต่วงการทหาร จนกระทั่งปี ค.ศ. 1966 ดูปองท์ได้ค้นพบเส้นใยสังเคราะห์ เรียกว่า “เส้นใยเคพลาร์” ซึ่งมีความอ่อนนุ่มและเหนียวช่วยการกระจายแรงปะทะได้ดี โดยทั่วไปเสื้อเกราะกันกระสุนจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ เสื้อนอก (Outside Shell Carrier) ส่วนยึดรั้ง (Fastening System) และ แผ่นรับแรงกระแทก หรือ แผ่นเกราะกันกระสุน (Bulletproof Vest Plate)

โดยแผ่นเกราะกระสุนเป็นส่วนที่ถูกใส่ไว้ภายในเสื้อเกราะกระสุน เพื่อช่วยดูดซับแรงกระแทก ลด หรือหยุดยั้งการเจาะจากลูกกระสุนปืน มีลักษณะเป็นเส้นใย ส่วนมากทอจากใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเคพลาร์ เส้นใยอะรามิด เมื่อถูกแรงกระแทกจะเกิดการยึดติดตัวช่วยดูดซับพลังงาน เพื่อลดความเร็วของกระสุนที่ผ่านเข้ามา แผ่นเกราะกันกระสุนควรมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ Level โดยถูกกำหนดจากสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทดสอบเกณฑ์การทดสอบ รวมถึงระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะ โดยจะบอกถึงความสามารถในการหยุดยั้งการทะลุหรือการทำลายที่เกิดจากหัวกระสุนในระดับต่างๆ

ปัจจุบันนี้มีการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุนจากเส้นใยสังเคราะห์มาเป็นเส้นใยจากธรรมชาติ เพราะถึงแม้เส้นใยสังเคราะห์จะมีความแข็งแรงทนทาน อีกทั้งยังมีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง เส้นใยจากธรรมชาติจึงเป็นอีกตัวเลือกที่น่าสนใจในการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่า เพราะสามารถหาได้ตามธรรมชาติ รวมถึงสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับพืชผลทางการเกษตร ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเส้นใยกล้วยเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงสูง และเหนียว โดยการปลูกกล้วยนั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้จากทุกส่วนแต่สำหรับการนำเส้นใยมาใช้ในการผลิตแผ่นเกราะกระสุนจะนำส่วนของลำต้น (Bast Fiber) มาใช้ ส่วนใหญ่มักจะเพาะปลูกทางจังหวัดตอนบนของประเทศไทย เช่น เชียงใหม่ เชียงราย และตาก เป็นต้น ^[1]

1.2 วัตถุประสงค์ และความมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุน จากวัสดุประกอบเรซินโดยอาศัยวัสดุเสริมแรงจากเส้นใยกล้วยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเสื้อเกราะกันกระสุน
2. เพื่อศึกษาการนำเส้นใยกล้วยมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุผสม (Fiber-Reinforced Composites, FRC)
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใย อาทิ รูปแบบการจัดเรียงตัว และจำนวนชั้นการทับกันของเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) ที่ได้จากการทดสอบวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงจากเส้นใยกัญชง

1.3 ขอบเขตการศึกษาและการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติ ส่วนประกอบ โครงสร้าง และประสิทธิภาพของเส้นใยจากกัญชง (Hemp Fiber)
2. ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของเส้นใยธรรมชาติ
3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยกัญชง) ให้มีความแข็งแรง เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ (Synthetic Fiber) เพื่อให้สามารถทนต่อแรงกระแทกและความเค้นแรงดึงได้
4. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test) และการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength Test) และ เมื่อผสมอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resins) ลงไปในเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยกัญชง)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

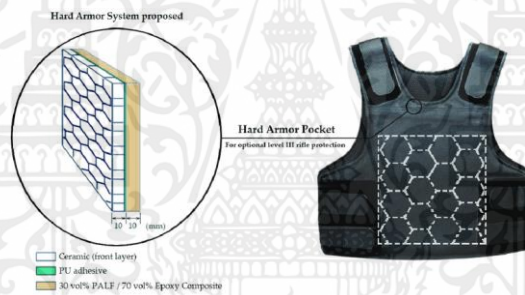
1. สามารถเพิ่มมูลค่าและเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นใยธรรมชาติได้
2. สามารถลดต้นทุนและลดมลพิษที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตและการทำลาย
3. สามารถนำพืชผลทางการเกษตรของชุมชนมาพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้
4. สามารถพัฒนาและปรับปรุงวัสดุแผ่นเกราะกันสุนซึ่งเป็นอาวุธและยุทธโปกรณ์ทางการทหารของประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เสื้อเกราะ

ในอดีตมนุษย์ได้นำวัสดุหลากหลายมาทำเป็นเสื้อเกราะ เพื่อใช้ในการป้องกันตัวเองจากอันตรายเมื่ออยู่ในสภาวะสงครามหรือสถานการณ์ที่เสี่ยงต่ออันตราย โดนแรกเริ่มนั้นชุดเกราะและโล่ถูกทำขึ้นจากหนังสัตว์ จากนั้นพัฒนาเป็นเกราะไม้และเกราะโลหะ เมื่อเวลาผ่านไปเสื้อเกราะดังกล่าวก็ใช้ไม่ได้ผลกับอาวุธสมัยใหม่ จำพวกกระสุนปืนต่างๆ ซึ่งในเวลานั้นสิ่งที่ป้องกันกระสุนปืนได้ดีที่สุดคือที่กำบังมนุษย์สร้างขึ้น เช่น เสื้อเกราะผ้าไหมนั้นสามารถป้องกันได้แค่กระสุนที่มีความเร็วต่ำ โดยที่ไม่สามารถกันกระสุนปืนสมัยใหม่ที่มีความเร็วเกินกว่า 600 ฟุต/วินาที แต่มีราคาสูงทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับเสื้อเกราะกันกระสุน รุ่นต่อมาเกิดขึ้นสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ถูกเรียกว่า “แฟลค แจ็กเกต” ผลิตขึ้นจากไนลอนสามารถกันสะเก็ดระเบิดและใช้ได้ผลอย่างดีกับการคุมคามของปืนพกและปืนไรเฟิล แต่เสื้อเกราะชนิดนี้มีข้อจำกัด คือ มีขนาดใหญ่เตอะทะและใช้ได้ในวงจำกัดเท่านั้น จนกระทั่งปลายยุค 1960 ค้นพบเส้นใยสังเคราะห์ชนิดใหม่ เรียกว่า เคพลา (Kevlar) ของบริษัทดูปอง (Dupont) ที่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเสื้อเกราะ[2]

2.2 มาตรฐานการทดสอบ NIJ

เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน NIJ แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะไว้ 5 ระดับ ดังนี้

- **ระดับ 1**

ประเภท IIA (9 มม.; .40 S&W) เกราะที่ใหม่และไม่ได้สวม จะต้องทดสอบด้วยกระสุน 9 มม. Full Metal Jacketed Round Nose (FMJ RN) ด้วยมวลที่ระบุ 8.0 กรัม (124 gr) และความเร็ว 373 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (1225 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .40 S&W Full Metal Jacketed (FMJ) ที่มี

มวล 11.7 กรัม (180 gr) และความเร็ว 352 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (1155 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที)

- **ระดับ 2**

ประเภท II (9 มม.; .357 Magnum) กระาะที่ใหม่และไม่ได้สวมใส่จะต้องทดสอบด้วยกระสุน 9 มม. FMJ RN ที่มีมวล 8.0 กรัม (124 ก.) และความเร็ว 398 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (1305 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที) และด้วยกระสุน .357 Magnum Jacketed Soft Point (JSP) ที่มีมวลที่กำหนด 10.2 กรัม (158 กรัม) และความเร็ว 436 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (1430 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที)

- **ระดับ 3**

ประเภท IIIA (.357 SIG; .44 Magnum) กระาะที่ใหม่และไม่ได้สวมใส่จะต้องทำการทดสอบด้วยกระสุน .357 SIG FMJ Flat Nose (FN) ด้วยมวลที่ระบุ 8.1 กรัม (125 gr) และความเร็ว 448 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (1470 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที) และด้วยกระสุน .44 Magnum Semi Jacketed Hollow Point (SJHP) ที่มีมวลที่กำหนด 15.6 กรัม (240 gr) และความเร็ว 436 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (1430 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที)

- **ระดับ 4**

ประเภท III (Rifle) กระาะแข็งหรือแผ่นแทรก จะต้องทดสอบในสภาวะปรับสภาพด้วย FMJ 7.62 มม., กระสุนเหล็กกล้า (ช็อกกองทัพสหรัฐ M80) ด้วยน้ำหนักที่กำหนด 9.6 กรัม (147gr) และความเร็ว 847 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (2780 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที)

- **ระดับ 5**

ประเภท IV (Armor Piercing Rifle) กระาะแข็งหรือแผ่นแทรก จะต้องทดสอบในสภาพที่ปรับสภาพแล้วด้วยกระสุนขนาด .30 ลักลิ่ง (AP) (ช็อกกองทัพสหรัฐ M2 AP) ด้วยมวลที่กำหนด 10.8 กรัม (166 gr) และความเร็ว 878 เมตร/วินาที \pm 9.1 เมตร/วินาที (2880 ฟุต/วินาที \pm 30 ฟุต/วินาที)

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน NIJ แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะ[3]

LEVEL	NIJ standard	TEST BULLET AND ITS MASS	VELOCITY (New Armor Vest)	Fire Dist.	MIN Shots	Maximum BFS depth
IIA	0101.06	9mm FMJ RN 124gr. (8.0g)	373m/s (1225ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
		.40 S&W FMJ 180gr. (11.7g)	352m/s (1155ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
II	0101.06	9mm FMJ RN 124gr. (8.0g)	398m/s (1305ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
		.357Magnum JSP 158gr. (10.2g)	436m/s (1430ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
IIIA	0101.04	9mm FMJ RN 124gr. (8.0g)	436m/s (1430ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
	0101.06	.357 SIG FMJRN 125gr. (8.1g)	448m/s (1470ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
		.44Magnum SJHP 240gr. (15.6g)	436m/s (1430ft/s)	5M	6	44mm (1.73 inch)
III	0101.06	7.62mm NATO FMJ 147gr. (9.6g)	847m/s (2780ft/s)	15M	6	44mm (1.73 inch)
IV	0101.06	.30 M2 AP 166gr. (10.8g)	878m/s (2880ft/s)	15M	1	44mm (1.73 inch)

2.3 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber) เป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการโดยเฉพาะทางด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยที่ได้มาจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยจากพืช สัตว์ และสารอนินทรีย์หรือแร่ธาตุ โดยเส้นใยพืชที่ได้มาจากส่วนเมล็ด ได้แก่ ฝ้าย ส่วนเส้นใยที่ได้มาจากใบ ได้แก่ เส้นใยศรนารายณ์ สับปะรด เส้นใยจากลำต้น ได้แก่ เส้นใยกล้วยขง งามี แพล็กซ์ เส้นใยจากผล ได้แก่ มะพร้าว เส้นใยจากก้าน เช่น ข้าว เป็นต้น

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ มีความหลากหลายขึ้นกับชนิดของของเส้นใย โดยเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยพอลิเมอร์หลัก 4 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เพกทิน (Pectin) และลิกนิน (Lignin) สัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลถึงสมบัติของเส้นใย องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.2

Fiber name	Cellulose (%)	Lignin (%)	Hemi cellulose (%)	Pectin (%)
<i>Sansevieria ehrenbergii</i>	80	7.8	11.25	0.45
Kenaf	45-57	21.5	8-13	0.6
Jute	61-71.5	11.8-13	17.9-22.4	0.2
Hemp	70.2-74.4	3.7-5.7	17.9-22.4	0.9
<i>Phormium tenax</i>	45.1-72.0	11.2	30.1	0.7
Flax	64.1-71.9	2.0-2.2	64.1-71.9	1.8-2.3
Agave	68.42	4.85	4.85	-
Bamboo	26-43	1-31	30	-
Sea grass	57	5	38	10
Ramie	68.6-91	0.6-0.7	5-16.7	1.9
Abaca	56-63	7-9	20-25	-
Alfa	45.4	14.9	38.5	-
Wheat straw	51	16	26	-
Sisal	78	8	10	-
<i>Sansevieria cylindrica</i>	79.7	3.8	10.13	-
Oil palm	65	17.5	10.12	-

รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด[11]

2.3.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

สมบัติของเส้นใยธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยธรรมชาติเท่านั้น สมบัติต่างๆ ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลส และปัจจัยอื่นๆ

Fiber	Density (g/cm ³)	Specific Modulus	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Flax	1.5	50	345-1100	27.6	2.7-3.2
Pineapple	1.53	40	170	1.44	14.5
Hemp	1.4	50	550-900	70	1.6
Jute	1.3-1.45	38	393-773	13-26.5	1.16-1.5
Ramie	1.0	-	400-938	61.4-128	1.2-3.8
Sisal	1.45	22	468-640	9.4-22	3-7
Abaca	1.5	-	857	41	1.10
Cotton	1.5-1.6	-	287-800	5.5-12.6	7-8
Coir	1.15	-	131-175	4-6	15-40
E-glass	2.6	-	1800-2700	73	2.5

รูปที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ[12]

2.4 กัญชง

กัญชง หรือ เฮมพ์ (Cannabis sativa L.subsp. sativa) มีชื่อทางพฤกษศาสตร์คือ Cannabis sativa L. กัญชง เป็นพืชเดิมที่ขึ้นอยู่ในเขตอบอุ่นของทวีปเอเชียสันนิษฐานว่า มีการกระจายพันธุ์เป็นบริเวณกว้างอยู่ทางตอนกลางของทวีป ได้แก่ พื้นที่ทางตอนใต้ของแคว้นไซบีเรีย ประเทศเปอร์เซีย ทางตอนเหนือของประเทศอินเดียบริเวณแคว้นแคชเมียร์และเชิงเขาหิมาลัย และประเทศจีน

ซึ่งกัญชงจะมีลำต้นสูงมากกว่า 2 เมตร ปล้องหรือข้อยาว แตกกิ่งก้านน้อยและแตกกิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เปลือกเหนียวลอกง่าย ให้เส้นใยยาวคุณภาพสูง แผ่นใบเป็นสีเขียวอมเหลือง ใบมีแฉกประมาณ 7-9 แฉก การเรียงตัวของใบค่อนข้างห่าง เมื่อออกดอกจะมียางที่ช่อดอกไม่มาก เมล็ดมีขนาดใหญ่และเป็นลายบ้าง ผิวเมล็ดหยาบด้าน ใบเมื่อนำมาสูบจะมีกลิ่นหอมน้อย ทำให้ผู้เสพปวดหัว ซึ่งพืชที่ให้ปริมาณ Tetrahydrocannabinol (THC) น้อยกว่า 0.3% ไม่ถือว่าเป็นพืชเสพติด โดยการปลูกระยะห่างระหว่างต้นจะแคบ และกัญชงที่ปลูกเป็นอุตสาหกรรมจะต้องมีปริมาณ THC ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากปลูกเพื่อต้องการเส้นใยเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของกัญชง[27]

ลักษณะ	กัญชง
THC Δ -9-tetrahydrocannabinol (%)	< 1
CBD (Cannabidiol): THC	≥ 2
%Fiber (Maximum)	35 %

2.4.1 ลักษณะการทอเส้นใย

การทอผ้าเป็นการนำเส้นด้ายพื้นและเส้นด้ายพุ่งมาสานกัน โดยที่ด้ายยืน (Warp yarns) จะถูกร้อยขึงตั้งในเครื่องทอผ้า ในขณะที่ด้ายพุ่ง (Weft yarns) จะสอดเข้าไปในด้ายยืนข้างบนหรือข้างล่าง แล้วแต่ว่าจะมีรูปแบบการทอ (Fabric weave) แบบไหน รูปแบบการทอที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

2.4.1.1 การทอผ้าหรือปายทอแบบลายธรรมดา (Plain Weave)

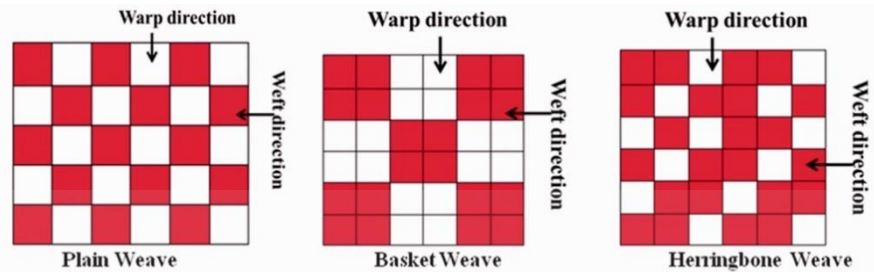
เป็นโครงสร้างผ้าที่ง่ายที่สุดเกิดจากการขัดสานระหว่างเส้นด้ายยืนชุดหนึ่งและเส้นด้ายพุ่งชุดหนึ่ง ตามแบบโครงสร้างที่กำหนดไว้ คือ 1 : 1 ซึ่งทำให้เกิดมุมที่เส้นยืนและเส้นพุ่งตัดกันทำมุม 90 องศา ผ้าทอลายนี้แข็งแรงที่สุด เพราะด้ายสานกันอย่างหนาแน่นด้ายยืนและด้ายพุ่งจะทอขึ้นลงสลับกัน

2.4.1.2 การทอผ้าแบบลายตะกร้า (Basket Weave)

รูปแบบการทอที่ถูกลับกันเพื่อสร้างลวดลายที่คล้ายตะกร้า เป็นการใช้ด้ายพุ่งสานด้ายยืนแบบ บน 2 ล่าง 2 ผลการทอแบบนี้จะได้ผ้าที่ด้าน มีความยืดหยุ่น มีโครงสร้างที่หลวมกว่า มีความคงทนน้อยกว่าการทอแบบธรรมดา (plain weave)

2.4.1.3 การทอผ้าแบบลายก้างปลา (Herringbone Weave)

เป็นรูปแบบการทอที่มีลักษณะที่สลับไปมาของเส้นใยทำให้เกิดลวดลาย ลักษณะของลวดลายจะคล้ายกับตัวอักษร V ที่ถูกวางตั้งทิศทางเป็นแถบแบบสลับไปมาคล้ายก้างปลา



รูปที่ 2.4 รูปแบบการทอเส้นใย (ก) Plain Weave (ข) Basket Weave (ค) Herringbone Weave[21]

2.5 การปรับสภาพเส้นใย (Fiber Pretreatment)

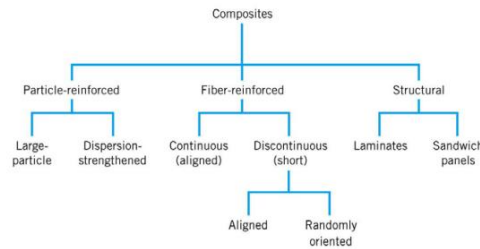
การปรับสภาพเส้นใย คือ กระบวนการเตรียมเส้นใยธรรมชาติ สำหรับการใช้งานในขั้นตอนต่อไป โดยการปรับสภาพเป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากจะช่วยกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ช่วยปรับปรุงคุณภาพเส้นใย และทำให้เส้นใยมีความเหมาะสมมากขึ้น เช่นมีความแข็งแรง ทนทานมากขึ้น เป็นต้น

การปรับสภาพทางเคมี (Chemical Treatments) ใช้สารเคมีเพื่อกำจัดส่วนประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส (Cellulose) เช่น เพกติน (Pectin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ออกจากเส้นใยธรรมชาติ เช่นการใช้ Chemical Chelators เช่นกรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิติก (Ethylenediaminetetraacetic Acid, EDTA) ใช้เพื่อคลายโครงสร้างเพกตินของเส้นใยธรรมชาติได้ ในขณะที่เบส เช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) ใช้เพื่อกำจัดโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส เช่นโซลิกูลูแคน ออกจากเส้นใยธรรมชาติ การกำจัดเพกตินถือเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากทำหน้าที่เป็นกาวในการยึดเส้นใยเดี่ยวเข้าด้วยกัน ดังนั้น การกำจัดเพกตินจึงช่วยเพิ่มการผลิตเส้นใยแต่ละชนิด และเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของเส้นใย อีกทั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังถูกใช้ในการปรับค่า pH ของสารละลาย EDTA เนื่องจาก EDTA มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ (Insoluble) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้สารละลายมีความเป็นเบสและมีสภาวะที่เหมาะสมในการละลายของ EDTA มากขึ้น

2.6 วัสดุคอมโพสิต หรือวัสดุผสม (Composite Materials)

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีสมบัติต่างกัน ทำให้ได้สารที่มีสมบัติที่ดีขึ้น เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น หรือเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งจะเป็นสารพอลิเมอร์ โดยจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจาย หรือตัวเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งตัวเสริมแรงจะมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ประเภทของวัสดุผสม[25]

2.6.1 วัสดุเนื้อพื้น (Matrix Phase Material)

ในพอลิเมอร์คอมโพสิต เมทริกซ์ที่ใช้อาจจะเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic) หรือเทอร์มอเซต (Thermosets) โดยที่เมทริกซ์มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
- ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับเส้นใย
- สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
- ช่วยกำหนดรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต
- ต้องเชื่อมต่อกับตัวเสริมแรง

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.6.1.1 เทอร์มอเซต (Thermoset)

พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปร่างถาวร ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้าง พอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง โดยเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย แต่ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมเกิดการสลายตัว และมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์มอเซตที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ อีพ็อกซี พอลิเอสเทอร์ และไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์มอเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัว จะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง นอกจากนี้เมื่อมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้นน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง (Crosslinking) จะมีค่าลดลง ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความสามารถในการยึดตัวต่ำ ความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว

2.6.1.2 เทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic)

เทอร์มอพลาสติกจะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลง แยกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์มอพลาสติกอสัญฐาน (Amorphous Thermoplastic) และ เทอร์มอพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-Crystalline Thermoplastic)

เทอร์มอพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ดังนั้นความแข็งแรงและความแข็งของเมทริกซ์ที่ได้นั้น จะเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำ (Repeating Unit) หรือมอนอเมอร์ (Monomer) และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง ตัวอย่างเทอร์มอพลาสติก เช่น พอลิสไตรีน พอลิพรอพีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

2.6.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement Material)

เป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Reinforcement) ให้กับวัสดุ มีรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้ตัวเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ตัวเสริมแรงมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต
- สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกที่กระทำต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำ โดยแรงกระทำนั้นๆ จะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย โดยที่ลักษณะของเส้นใยที่เป็นตัวเสริมแรงที่ดี จะต้องมียุทธศาสตร์ดังต่อไปนี้
- เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็ก
- อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูง
- มีความโค้งงอและความยืดหยุ่นสูง
- มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าความแข็งแรง (Tensile Strength) สูง

วัสดุผสมสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

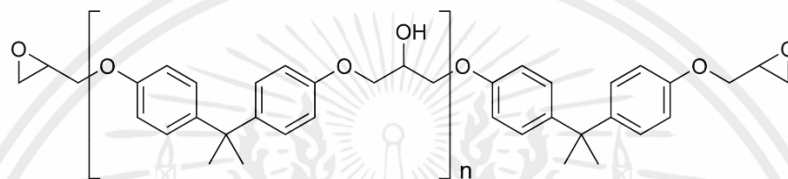
1. วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composites) ประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นเนื้อเดียวต่อเนื่องกัน และมีการเสริมแรงและเพิ่มสมบัติให้กับเนื้อพื้นที่ด้วยการเติมสารเสริมแรงแบบเม็ดผง

2. วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composites) เป็นตัวเสริมแรงที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรืออาจจะเป็นเส้นใยขนาดสั้นกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ความแข็งแรงของพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจะถูกกำหนดโดยสมบัติของเส้นใย สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยในเมทริกซ์ ความยาวและการกระจายตัวของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ซึ่งต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดแรงกระทำจากภายนอกสามารถแยกเส้นใยและเมทริกซ์ออกจากกันได้ ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber) และเส้นใยธรรมชาติต่างๆ

3. วัสดุผสมโครงสร้าง (Structural Composites) สามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้วยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย คอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือ คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar Composite) และ ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel)

2.7 เรซิน และสารเพิ่มความแข็งแรง

Epoxy Resin หรือ อีพ็อกซี จัดอยู่ในกลุ่ม Thermosetting Polymer ความหมายคือ เมื่อผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรกแล้วจะมีความแข็งแรงทนทานมาก ไม่คืนรูปและไม่สามารถนำมารีไซเคิลใหม่ได้ Epoxy เป็น Copolymer ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยปกติ Epoxy resin ได้จากการทำปฏิกิริยาของ Bisphenol A กับ Epichlorohydrin Monomer และสารเพิ่มความแข็งแรง (Hardener) ประเภท Polyamine ระยะเวลาการเซตตัว ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานในครั้งนั้นๆ เช่นการผสม part A + part B ปริมาณมาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและมีความร้อนสะสมมากกว่า สามารถเร่งให้เซตตัวได้เร็วขึ้นด้วยความร้อน ยกตัวอย่าง เครื่องอบงานเรซิน ได้ถูกปรับอุณหภูมิอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส ย่นระยะเวลาจาก 24 ชั่วโมง เหลือ 4 ชั่วโมงได้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอีพ็อกซี[26]

2.7.1 Epoxy EPOTEC YD 535LV และ Hardener TH7253

เป็นอีพ็อกซีซึ่งประกอบด้วยเรซินหนึ่งตัวและสารเพิ่มความแข็งแรงมีให้เลือกถึง 6 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะกับเทคนิคที่จะใช้ส่วนใหญ่ที่มีสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน สารที่เพิ่มความแข็งแรง EPOTEC TH7253 มีลักษณะที่แข็งตัวที่รวดเร็วและสามารถนำไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กที่สามารถถอดประกอบได้ในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของส่วนประกอบ[24]

คุณสมบัติ	หน่วย	เรซิน YD 535LV	Hardener	
			TH7255	TH7257
ลักษณะทางกายภาพ	-	ของเหลวใสไม่มีสี	ของเหลวใสไม่มีสี	ของเหลวใสไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	-	1.1-1.2	0.98-1.04	0.93-0.99
ความหนืด @ 25 °C	cPs	1,000-1,500	50-150	10-50

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของการผสมและการบ่มทางเคมี[24]

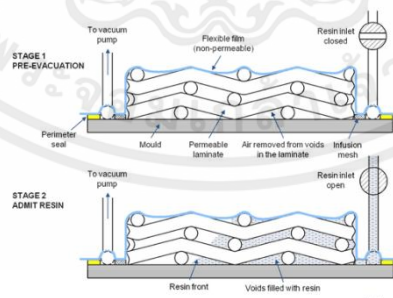
สมบัติ	หน่วย	TH7255	TH7257
Mixing ratio with YD 535LV	Pbw	34 - 36	34 - 36
Pot life of 100 gms mix @ 20°C	นาที	30-40	360-420

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

@ 25°C	นาที	25-35	280-330
1MM Thick Film Gel Time			
@ 20-25°C	ชั่วโมง	4 - 5	10 - 12
@ 40-45°C	นาที	50	3 - 4
Curing Shrinkage	%	1.6	1.5
Glass Transition temp.			
25°C / 8 days	°C	65 ± 5	50 ± 2
24hrs/25°C + 4hrs/80°C	°C	85 ± 5	80 ± 5

2.8 การเวกคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion)

เป็นเทคนิคที่ใช้แรงดันสุญญากาศในการขับเคลื่อนเรซินเข้าไปลามิเนต วัสดุจะถูกวางลงในแม่พิมพ์ให้แห้งและใช้สุญญากาศก่อนที่จะใช้เรซินแนะนำ เมื่อสุญญากาศเสร็จสมบูรณ์เรซินจะถูกดูดเข้าไปในลามิเนตผ่านทางวางท่ออย่างระมัดระวัง กระบวนการนี้ใช้วัสดุหลายประเภท ตัวน้ำยาจะถูกทาลงบนแม่พิมพ์ ใช้สุญญากาศดูดเรซินส่วนเกินออกจากลามิเนต การบรรจุสุญญากาศช่วยเพิ่มอัตราส่วนไฟเบอร์ต่อเรซินได้อย่างมากและส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงและเบาขึ้น การทำ Vacuum Infusion เป็นกระบวนการที่เติมเต็มช่องว่างของวัสดุด้วยเรซินเหลว เมื่อเรซินแข็งตัว เมทริกซ์เรซินที่เป็นของแข็งจะยึดส่วนประกอบของวัสดุเข้าด้วยกันเป็นส่วนประกอบที่แข็งเป็นหนึ่งเดียว เหล็กเสริมสามารถเป็นวัสดุที่มีช่องว่างที่เข้ากันได้กับเรซินเพื่อปรับปรุงการเคลือบในด้านคอมโพสิต วัสดุทั่วไป ได้แก่ เส้นใยอนินทรีย์ (โดยมีใยแก้วเป็นส่วนใหญ่) เส้นใยอินทรีย์ เช่น ฝ้ายลินิน หรือเส้นใยผสมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น โฟมเซลล์ปิดบอลซาวูดและรังผึ้ง วัสดุพูนยังสามารถผสมลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ไม่มีรูพูนเช่นโลหะแผ่น เรซินมักเป็นประเภทเทอร์โมเซตติง แต่เรซินเทอร์โมพลาสติกยังสามารถใช้สำหรับการ infusion ได้



รูปที่ 2.7 กระบวนการเวกคัม อินฟิวชัน[27]

2.9 การทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงชิ้นงานทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นงานอยู่ในสถานะการยืดและเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำ การ

ตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้นนั่นคือ การเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยความยาวระยะทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงจะแตกต่างกันไปตามมาตรฐานและวัสดุที่ทดสอบ

ลักษณะด้านการทดสอบที่สามารถหาได้จากวิธีการทดสอบนี้ ได้แก่

- **ความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)** จุดที่วัสดุรับแรงดึงได้สูงสุดก่อนที่วัสดุจะเกิดคอคอดขึ้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (2.1)$$

โดยที่ σ_i คือ แรงดึงที่จุดสูงสุด (N/m² หรือ MPa)

P_i คือ แรงดึงที่จุดสูงสุด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ (m²)

- **โมดูลัสรับแรงดึงของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)** เป็นค่าบอกระดับความแข็งแกร่งของวัสดุ ดังสมการที่ 2.2

$$\lambda = \frac{Fl}{Ax} \quad (2.2)$$

โดยที่ λ คือ ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (psi)

F คือ แรง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรง (m²)

x คือ ส่วนที่ยืดออกของวัสดุ (m)

l คือ ความยาวปกติของวัสดุ (m)

- **ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)** ความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับผิวต่อพื้นที่ภาคตัดขวาง มีผลทำให้วัตถุยาวขึ้น ดังสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

โดยที่ σ คือ แรงเค้น (psi)

F คือ แรงดึงในทางเดียวเฉลี่ย (N)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (cm²)

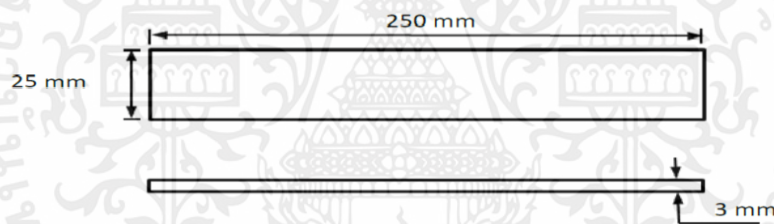
ตัวอย่างมาตรฐาน ASTM ในการทดสอบแรงดึง ได้แก่

2.9.1 มาตรฐาน ASTM D3039 การทดสอบแรงดึงของพอลิเมอร์และคอมโพสิต

ASTM D3039 เป็นมาตรฐานการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำหนดคุณสมบัติแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากคุณสมบัติน้ำหนักเบาและความต้านทานแรงดึงสูง วัสดุคอมโพสิตจึงได้รับความนิยมมากขึ้นจากอุตสาหกรรมการบินและอวกาศและยานยนต์ และกำลังถูกนำมาใช้เพื่อทดแทนโลหะในการใช้งานมากมาย แม้ว่าจะมีคอมโพสิตหลายประเภท ASTM D3039 ใช้เฉพาะกับคอมโพสิตที่ประกอบด้วยเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เสริมด้วยเส้นใยโมดูลัสสูงเท่านั้น คู่มือนี้ออกแบบมาเพื่อแนะนำเกี่ยวกับองค์ประกอบพื้นฐานของการทดสอบแรงดึง ASTM D3039

ASTM D3039 เป็นวิธีการทดสอบมาตรฐานที่กำหนดโดย ASTM International (เดิมชื่อ American Society for Testing and Materials) เพื่อกำหนดคุณสมบัติแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตขั้นสูง วิธีการทดสอบนี้มักใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต เช่น พอลิเมอร์เสริมคาร์บอนไฟเบอร์หรือวัสดุอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกัน

ตัวอย่างจะถูกวางให้ห่างจากที่จับของเครื่องทดสอบและดึงออกมาจนกว่าจะขาด อัตราการทดสอบสำหรับ ASTM D3039 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบโดยทั่วไปสำหรับวัสดุคอมโพสิตคือ 2 มิลลิเมตร/นาที เครื่องวัดการยืด (Strain Gauge) ใช้เพื่อกำหนดโมดูลัสการยืดตัวและแรงดึง



รูปที่ 2.8 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039[29]

ขนาดของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องทำให้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 25 มม. (1 นิ้ว) และยาว 250 มม. (10 นิ้ว) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 วิธีการทดสอบนี้ออกแบบมาเพื่อสร้างข้อมูลคุณสมบัติแรงดึงสำหรับคุณสมบัติของวัสดุ การวิจัยและพัฒนาการประกันคุณภาพ การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตอบสนองแรงดึงและควรรายงาน ได้แก่ วัสดุ วิธีการเตรียมและการจัดวางวัสดุ ลำดับการเรียง การเตรียม การปรับสภาพ สภาพแวดล้อมในการทดสอบ การจัดตำแหน่งและการยึดเกาะ ความเร็วในการทดสอบ อุณหภูมิ เวลา และร้อยละโดยปริมาตรในการเสริมแรง

2.9.2 มาตรฐาน ASTM D5034 การทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของผ้าหรือสิ่งทอ

มาตรฐาน ASTM D5034 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของผ้าและวัสดุเสริมด้วยการรับแรง (Grab Test) โดยวิธีการทดสอบของมาตรฐานนี้จะใช้วิธีการเตรียมขนาดชิ้นงานและการจัดวางวัสดุเช่นเดียวกับ ASTM 3039 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบโดยทั่วไปสำหรับวัสดุที่เป็นผ้าสิ่งทอคือ 5 มิลลิเมตร/นาที เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นแล้ว ผลการทดสอบที่ได้คือค่าแรงดึงและระยะการยืดตัวของผ้าหรือสิ่งทอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนียว (Toughness) และความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุนั้นๆ โดยลักษณะของแรงที่มากระทำนั้น จะต้องอยู่ในลักษณะแรงเคลื่อนที่ (Dynamic Load) มากระทำด้วยความเร็วเพื่อให้เกิดการแตกหักในเวลาอันสั้น จึงจะเรียกว่า “การกระแทก”

การทดสอบการกระแทกเป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของวัสดุ ค่าความแข็งแรงของการกระแทกจะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (Shock Load) แม้พลังงานไม่สามารถสร้างและทำลาย แต่พลังงานการกระแทกจะสูญเสียไปในหลายลักษณะ เช่น ถูกใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุ เป็นต้น ในการทดสอบการกระแทกจะใช้พลังงานของลูกตุ้มกระแทกให้ขึ้นทดสอบแตกหัก โดยพลังงานจะนิยามเป็นงานซึ่งเป็นแรงที่กระทำเป็นระยะทางหนึ่ง ดังสมการ

- การคำนวณงาน (Work)

$$W = FD \quad (2.4)$$

โดยที่ W คือ งาน (lbft หรือ Nm)

F คือ แรงที่กระทำ (lb หรือ N)

D คือ ระยะทางในช่วงที่แรงกระทำ (lnch หรือ m)

วัตถุประสงค์การทดสอบการกระแทกคือการวัดงานที่ใช้ในการแตกหักภายใต้การกระแทกอย่างฉับพลัน ซึ่งสามารถหาได้จากการปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักแน่นอนลงบนชิ้นทดสอบด้วยความสูงค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.9 แล้วทำการคำนวณค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกหรือความต้านทานการกระแทกของวัสดุจากผลต่างของระดับพลังงานศักย์ของลูกตุ้มก่อนและหลังการกระแทกด้วยสมการต่อไปนี้

- การคำนวณค่าการดูดซับพลังงานการกระแทก (Energy Absorbed)

$$E = w(h-h') \quad (2.5)$$

$$\text{หรือ} \quad = mg(h-h') \quad (\text{ในหน่วยเมตริก})$$

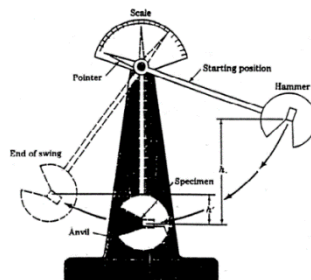
โดยที่ E คือ พลังงานที่ได้จากการปล่อยตุ้มน้ำหนัก (lbft หรือ Nm)

w คือ น้ำหนักของลูกตุ้ม (lb)

m คือ มวลของตุ้มน้ำหนัก (kg)

h, h' คือ ความสูงของลูกตุ้มก่อนและหลังกระแทกตามลำดับ (ft หรือ m)

g คือ อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s²)



รูปที่ 2.9 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก[31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของวัสดุที่สัมพันธ์กับการแตกหักเรียกว่าความแกร่ง (toughness) โดยสาเหตุของการแตกหักมาจากการกระแทกหรือแรงกระทำแบบฉับพลัน โดยความเหนียวและความแข็งแรงจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแกร่งของวัสดุ และ โดยทั่วไปจะใช้การทดสอบการกระแทกในการวัดความแกร่งของวัสดุ

แรงที่กระทำในการทดสอบการกระแทกสามารถทำได้ทั้งในรูปของการตีตอ การตีง การอัด หรือการบิด แต่ที่นิยมใช้คือแรงตีตอและที่นิยมใช้น้อยสุดคือแรงตีง ส่วนแรงอัดและแรงบิดจะใช้เฉพาะกรณีเท่านั้น การตีกระแทกสามารถทำได้ด้วยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนัก การเหวี่ยงลูกตุ้มหรือการหมุนวงล้อ บางการทดสอบจะเป็นการทดสอบการแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยการกระแทกเพียงครั้งเดียว และบางการทดสอบเป็นการแตกหักชิ้นทดสอบด้วยการกระแทกหลายครั้งด้วยน้ำหนักเดิม โดยเพิ่มความสูงลูกตุ้มขึ้นเรื่อยๆ จนชิ้นงานแตกหัก ซึ่งตัวอย่างมาตรฐาน ASTM ในการสอบแรงตีงด้วยเส้นใย ได้แก่

2.10.1 มาตรฐาน ASTM D256 สำหรับกำหนดแรงกระแทกลูกตุ้มไอซอดของพลาสติก (Izod Notched Impact Test on Plastics)

เป็นการทดสอบที่ใช้วัดความต้านทานของวัสดุต่อการกระแทกจากลูกตุ้มที่แกว่ง การกระแทกของไอซอดหมายถึงพลังงานจลน์ที่จำเป็นในการเริ่มต้นการแตกหักและระหว่างการเกิดการแตกหักจะกว่าชิ้นงานจะแตกหัก ชิ้นงานการทดสอบไอซอดมีรอยบากเพื่อป้องกันการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบเมื่อนำไปกระแทก การทดสอบนี้สามารถใช้ตรวจสอบการควบคุมคุณภาพที่ง่ายและรวดเร็วเพื่อตรวจสอบว่าวัสดุตรงตามคุณสมบัติของการกระแทกหรือไม่ หรือเพื่อเปรียบเทียบวัสดุสำหรับความเหนียวทั่วไป

ชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดเข้ากับฟิกซ์เจอร์ทดสอบการกระแทกของลูกตุ้ม โดยด้านที่มีรอยบากหันไปทางขอบกระแทกของลูกตุ้ม ลูกตุ้มจะถูกปล่อยและปล่อยให้พุ่งทะลุชิ้นงานทดสอบ หากไม่เกิดการแตกหักให้ใช้ค้อนที่หนักกว่าจนกว่าจะเกิดความล้มเหลวหรือการแตกหัก เนื่องจากวัสดุหลายชนิด (โดยเฉพาะเทอร์โมพลาสติก) มีความต้านทานแรงกระแทกต่ำกว่าที่อุณหภูมิลดลง บางครั้งจึงเหมาะกับการทดสอบวัสดุที่อุณหภูมิที่จำลองสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง



รูปที่ 2.10 รอยบากของชิ้นงานทดสอบ[32]

ขนาดของชิ้นงาน

ตัวอย่างมาตรฐานสำหรับ ASTM คือ 64 x 12.7 x 3.2 มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงานที่พบมากที่สุดคือ 3.2 มิลลิเมตร (0.125 นิ้ว) แต่ความหนาคือ 64 มิลลิเมตร (0.25 นิ้ว) เนื่องจากไม่น่าจะโค้งงอหรือหักงอได้

ความไ้รอยบากของชิ้นงานทดสอบคือ 10.2 มิลลิเมตร (0.4 นิ้ว) ซึ่งความทนแรงกระแทกของ ISO แสดงเป็น kJ/m^2



รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ASTM D256[32]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

2.11.1 พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติ (T. O. Azeez 1, and O. D. Onukwuli (2018))

ตารางที่ 2.6 แสดงถึงปัจจัยของผ้าทอที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล เช่น แรงดึง แรงดัดงอ และแรงกระแทก ซึ่งจากตาราง จะเห็นได้ว่าปัจจัยของผ้าทอซึ่งประกอบไปด้วยประเภทลายทอ และจำนวนชั้น (หรือจำนวนการซ้อนกันของผืนผ้าทอ) จะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใย, ปริมาณเส้นใย, ความยาวเส้นใย และประเภทของลายทอ นอกจากนี้ความแข็งแรงยังขึ้นอยู่กับกาถ่ายโอนความเค้น (Stress Transfer) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าคุณสมบัติแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อผ้าทอมีจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น และสำหรับวัสดุคอมโพสิตการทอรูปแบบตะกร้า (Basket) ที่มีการซ้อนทับกันของเส้นใยจำนวน 3 ชั้น จะมีคุณสมบัติในการรับแรงดึงสูงกว่าเมื่อเทียบกับการทอรูปแบบอื่นๆ

ตารางที่ 2.5 ผลของรูปแบบการทอ และจำนวนชั้น (จำนวนการซ้อนกันของผืนผ้าทอ) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล[33]

No. of layer	composite	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)	Impact strength J/m
1	Plain	06.88 ± 0.62	0.85 ± 0.11	21.05 ± 1.31	1.31 ± 0.48	58 ± 27
	basket	11.76 ± 1.16	0.90 ± 0.10	31.20 ± 8.71	1.41 ± 0.42	129 ± 50
	Herringbone	15.92 ± 2.56	1.02 ± 0.18	33.40 ± 7.66	1.44 ± 0.32	94 ± 25
	Intra-ply	10.78 ± 2.70	1.10 ± 0.16	23.20 ± 9.01	1.76 ± 0.48	64 ± 40
2	Plain	15.16 ± 1.17	0.74 ± 0.23	29.08 ± 4.91	1.92 ± 0.52	62 ± 20
	basket	22.04 ± 1.39	1.00 ± 0.26	41.16 ± 9.35	1.77 ± 0.60	178 ± 37
	Herringbone	24.94 ± 3.08	1.05 ± 0.21	40.33 ± 6.81	2.49 ± 0.71	146 ± 20
	Intra-ply	27.36 ± 5.90	1.50 ± 0.10	41.37 ± 11.71	1.66 ± 0.51	168 ± 20
3	Plain	24.78 ± 1.49	1.11 ± 0.37	33.42 ± 5.16	1.31 ± 0.32	153 ± 32
	basket	42.08 ± 3.01	1.05 ± 0.39	56.02 ± 10.30	2.02 ± 1.11	224 ± 47
	Herringbone	35.70 ± 2.72	1.20 ± 0.31	53.86 ± 13.74	2.44 ± 0.58	186 ± 33
	Intra-ply	41.21 ± 2.32	1.36 ± 0.47	58.70 ± 3.53	2.57 ± 0.11	207 ± 26

2.11.2 ผลของการกำจัดเพกตินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยกล้วย และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (M. Liu et al. / Composites: Part A 90 (2016))

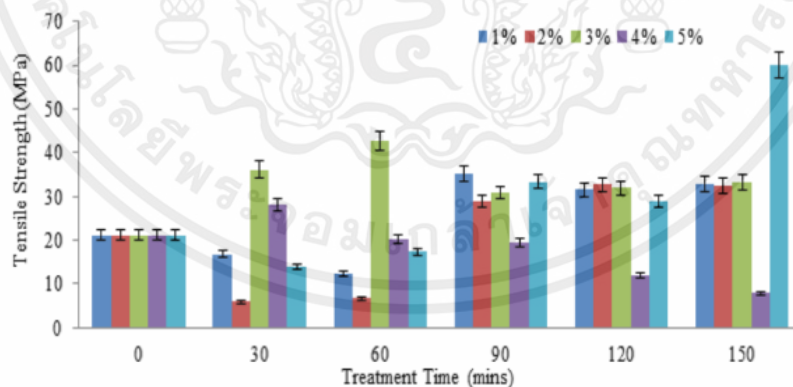
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย และคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ปรับปรุงประสิทธิภาพ ค่าจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย[34]

Fibre sample	Composite mechanical properties ¹			Effective fibre stiffness ² (GPa)	Effective fibre strength ² (MPa)
	Stiffness (GPa)	UTS (MPa)	Failure strain (%)		
Field retted	26.9 (0.6)	248 (17)	1.0 (0.1)	51.2 (1.1)	470 (34)
Untreated	33.8 (0.6)	294 (14)	1.0 (0.1)	64.9 (1.2)	562 (28)
0.5% EDTA	33.7 (0.8)	303 (20)	1.0 (0.1)	64.6 (1.5)	578 (20)
1.0% EDTA	33.7 (0.9)	297 (16)	1.0 (0.1)	64.7 (1.7)	567 (31)
3.0% EDTA	34.6 (1.0)	304 (12)	1.0 (0.1)	66.5 (1.9)	582 (24)

วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีส่วนประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส ได้แก่ เพกติน เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเส้นใยด้วยการปรับสภาพเส้นใย สามารถเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย EDTA กำจัดเพกตินออกจากเส้นใย ส่งผลให้ส่วน ที่ติดต่อกันระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์อ่อนแอลง คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยกล้วยจึงลดลง

การศึกษาผลของการกำจัดเพกตินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยกล้วย เพกตินและเฮมิเซลลูโลสถูก กำจัดออกจากเส้นใยโดย EDTA ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยมากขึ้น และส่งผลให้มีการเคลือบเส้นใยที่ดีขึ้น ด้วยเมทริกซ์อีพ็อกซี การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้น การใช้ 3.0% EDTA ส่งผลให้มีการกำจัดเพกตินมากที่สุด เป็นวิธีการปรับคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยผ่านการ ปรับสภาพเส้นใยที่ดีที่สุด

2.11.3 การทดสอบแรงดึงของเส้นใย CISSUS POPULNEA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย EDTA (M Rajesh, Savendra P Singh and Jeyaraj Pitchaimani (2016))

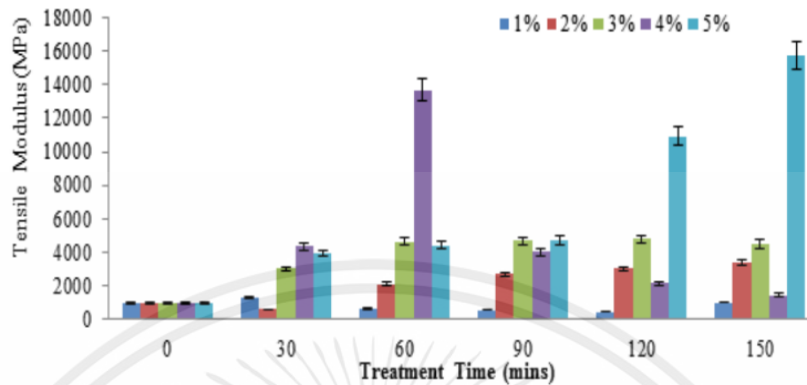


รูปที่ 2.12 ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย C.populnea ที่ปรับสภาพด้วย EDTA[35]

จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใย C.populnea ที่ปรับสภาพด้วย EDTA 1,2 และ 5 % ตามลำดับ เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งในตอนแรกค่าลดลง จากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 35.29 , 32.65 และ 59.97 MPa ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้น 66.8, 54.3 และ 183.4% uCPF ที่เวลา 90, 120 และ 150 นาที สามารถอนุมานได้ว่าการปรับสภาพด้วย 3% EDTA เป็นเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 นาที และ 4% EDTA เป็นเวลา 60 นาที จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 32.1 และ 101.5 % uCPF ตามลำดับ สรุปได้ว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเส้นใย C.populnea คือที่สภาวะการปรับสภาพด้วย 5% EDTA เป็นเวลา 150 นาที



รูปที่ 2.13 โมดูลัสแรงดึงของเส้นใย C.populnea ที่ปรับสภาพด้วย EDTA[35]

จากรูปที่ 2.13 แสดงผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วย EDTA ในรูปของแรงดึงโมดูลัสของเส้นใย (Tensile Modulus) สังเกตได้ว่า โมดูลัสแรงดึงของเส้นใย C.populnea ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย EDTA จะแปรผันตามสภาวะของการปรับสภาพ และจะถึงระดับสูงสุดที่สภาวะการปรับสภาพ 1, 2, 3, 4 และ 5% ที่เวลา 30, 150, 120, 60 และ 150 นาที ตามลำดับซึ่งเพิ่มขึ้น 138.0, 357.4, 511.1, 1469.0 และ 1,690.3 % uCPF สรุปได้ว่าค่าโมดูลัสแรงดึงสูงสุดของเส้นใย C.populnea คือที่สภาวะการปรับสภาพด้วย 5% EDTA เป็นเวลา 150 นาที

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงและแรงดึงโมดูลัสจะเห็นได้ว่า ยิ่งใช้ความเข้มข้นของ EDTA ในการปรับสภาพมากขึ้น และใช้เวลาในการปรับสภาพที่นานขึ้น จะได้ค่าแรงดึง (Tensile Strength) และแรงดึงโมดูลัส (Tensile Modulus) สูงขึ้นตามไปด้วย

2.11.4 ใยแก้ว/ท่อคาร์บอน/คอมโพสิตอีพ็อกซีไฮบริด: ให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

(Saman Dehrooyeh, Majid Vaseghi, Majid Sohrabian, Mahmood Sameezadeh (2021))

ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตระหว่าง CNT กับอีพ็อกซีเรซินที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของ CNT แตกต่างกันเทียบกับอีพ็อกซีเรซินที่ไม่ได้เติม CNT [36]

CNT content (wt %)	0	0.1	0.5	1
Mechanical properties				
Tensile strength (MPa)	50.780 ± 2.88	54.107 ± 2.42	61.021 ± 2.15	58.393 ± 2.27
Young's modulus (GPa)	1.353 ± 0.065	1.488 ± 0.073	1.802 ± 0.063	1.704 ± 0.069
Failure strain (%)	6.07 ± 0.39	5.86 ± 0.35	5.42 ± 0.28	5.50 ± 0.26
Toughness (kJ/m³)	1858.95 ± 109.7	1912.24 ± 103.3	1994.57 ± 94.1	1943.93 ± 92.9

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) จัดเป็นสารเสริมแรงที่ดีที่สุดสำหรับการพัฒนาสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซิน เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงที่เหมาะสม อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงสำหรับการถ่ายโอนความเครียดอย่างเหมาะสมและสม่ำเสมอ

ตารางที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลในคอมโพสิตระหว่าง CNT กับอีพ็อกซีเรซินเทียบกับอีพ็อกซีเรซินที่ไม่ได้เติม CNT [36]

CNT content (wt%)	Tensile strength change compared with neat epoxy (%)	Young's modulus change compared with neat epoxy (%)	Failure strain change compared with neat epoxy (%)	Toughness change compared with neat epoxy (%)
0.1	+6.53	+9.97	-3.45	+2.86
0.5	+20.16	+33.18	-10.70	+7.29
1	+14.99	+25.94	-9.39	+4.57

ตารางที่ 2.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่มีการเติมผงท่อนาโนคาร์บอน (CNT Powder) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.1, 0.5 และ 1 wt% เปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ได้เติม CNT พบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ดีขึ้นมากในกรณีเมื่อเติม CNT ในปริมาณ 0.5 wt% ลงในเมทริกซ์ โดยค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าเพิ่มขึ้นจากในกรณีที่ไม่ได้เติม CNT ประมาณ 20.16% ดังแสดงในตารางที่ 2.8 เนื่องจาก CNT จะทำให้เมทริกซ์ของคอมโพสิตทนต่อความเค้นที่มากระทำเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติม CNT ในปริมาณที่มากกว่าหรือน้อยกว่า 0.5 wt% สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตมีแนวโน้มที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญมากนัก ดังเช่นในกรณีที่เติม CNT 1 wt% ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นจากในกรณีที่ไม่ได้เติม CNT เพียง 14.99% ซึ่งขัดแย้งกับแนวโน้มโดยทั่วไปที่ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงน่าจะแปรผันตรงกับปริมาณ CNT ที่เติมลงไป ในเมทริกซ์ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อในเมทริกซ์มีปริมาณของ CNT ที่มากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันแล้วจับตัวเป็นก้อนจึงทำให้การกระจายตัวในเมทริกซ์เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงไม่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบการเติมผงท่อนาโนคาร์บอนลงในเมทริกซ์ของอีพ็อกซีคอมโพสิต การเติม CNT ในปริมาณ 0.5 wt% จะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้นมากที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การดำเนินการเตรียมเส้นใย (Fiber Pretreatment)

3.1.1 สารเคมี

- 1) Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA)
- 2) Sodium Hydroxide (NaOH)
- 3) น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง (2-Digits Balance)
- 2) กระจกตวง (Measuring Cylinder)
- 3) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 4) เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (Hotplate Magnetic Stirrer)
- 5) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Stirring Bar)
- 6) เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท (Mercury Thermometer)
- 7) แท่งแก้วกวนสาร (Stirring Rod)
- 8) หลอดหยด (Dropper)
- 9) กระดาษลิตมัส (Litmus Paper)
- 10) ผ้าทอเส้นใยกัญชง (Hemp Fiber Fabric)

3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมเส้นใยกัญชง 4 กรัม
- 2) ชั่งสาร Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) 6 กรัม ลงในปีกเกอร์ แล้วเติมน้ำ DI ลงไปละลายจนได้ปริมาณ 200 มิลลิลิตร และใช้แท่งแก้วกวนสารคนสารละลาย
- 3) ชั่งสาร Sodium Hydroxide (NaOH) 10 กรัม ลงในปีกเกอร์ แล้วเติมน้ำ DI ลงไปละลายจนได้ปริมาณ 50 มิลลิลิตร และใช้แท่งแก้วกวนสารคนสารละลาย
- 4) นำสารละลาย EDTA ไปกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงในปีกเกอร์ จากนั้นเปิดเครื่องกวนสารละลาย เพื่อให้แท่งแม่เหล็กกวนสารช่วยคนสารให้ละลายกันเร็วขึ้น
- 5) นำสารละลาย NaOH ค่อยๆ หยดลงไปนสารละลาย EDTA เพื่อปรับค่า pH (pH เท่ากับ 6) และช่วยละลาย EDTA (เนื่องจากสาร EDTA มีสมบัติไม่ละลายในน้ำ)
- 6) หลังจากนั้นตวงสารละลายทั้งหมดปริมาณ 160 มิลลิลิตร ลงในปีกเกอร์
- 7) ตั้งค่าอุณหภูมิของสารละลายที่ได้เตรียมไว้ในข้อ 6) ที่อุณหภูมิ 40 °C ทำการวัดอุณหภูมิโดยการจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ไว้ตลอดการกวนสาร แล้วจึงนำเส้นใยกัญชงใส่ลงไปในปีกเกอร์เพื่อทำการหมัก โดยนำแท่งแม่เหล็กกวนสารลงไปอยู่ในปีกเกอร์ จากนั้นเปิดเครื่องสารละลายพร้อม

ให้ความร้อนแบบดิจิตอลที่มีความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เพื่อให้อุณหภูมิของสารและเส้นใยแก้วที่หมักไว้เกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึง

- 8) นำเส้นใยออกมาล้างกับน้ำ DI เพื่อชะล้างสารละลายจากขั้นตอนการ pretreat ออก
- 9) ตั้งค่าอุณหภูมิของตู้อบไว้ที่อุณหภูมิ 50 °C แล้วนำเส้นใยแก้วที่ได้จากข้อ 8) มาอบทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง
- 10) นำเส้นใยแก้วที่ผ่านการ Pretreatment และเส้นใยแก้วที่ไม่ผ่านการ Pretreatment ไปทดสอบดึง Tensile เพื่อเปรียบเทียบค่าของ Tensile strength

หมายเหตุ ขั้นตอนการทดลองในส่วนของการปรับสภาพเส้นใยนั้น สามารถทดลองในอัตราส่วนของสารละลายต่อเส้นใยที่ 40 cm³ : 1 g แต่เนื่องจากผู้ทดลองไม่สามารถปรับสภาพเส้นใยในครั้งเดียวได้หมด จึงมีการแบ่งแยกปรับสภาพในแต่ละรอบๆ

3.2 การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วด้วยวิธีการแวคคัม อินฟิวชั่น (Forming of Hemp Fiber-Reinforced Composites Materials by Vacuum Infusion)

3.2.1 สารเคมี

- 1) อีพ็อกซีเรซิน (Part A - Epoxy Resin : YD 535 LV)
- 2) สารเพิ่มความแข็งแรง (Part B - Hardener : TH 7255)

3.2.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) แผ่นตาข่ายส่งเรซิน (Infusion Flow Net)
- 2) ฟิล์มลอกแบบ/ฟิล์พาย (Peel Ply)
- 3) แบริกกิ้งฟิล์ม (Vacuum Bagging Film)
- 4) ท่อพีอี (PE Tube)
- 5) ท่อสไปรอล (Spiral Tube)
- 6) ซีลแลนท์เทป (Sealant Tape)
- 7) ซีแคลมป์ (C-Clamp)
- 8) ปั๊มแวคคัม (Vacuum Pump)
- 9) ถ้วยดักเรซิน (Resin Catch Pot)
- 10) บีกเกอร์ (Beaker)
- 11) หลอดหยด (Dropper)
- 12) ผ้าทอเส้นใยแก้ว (Hemp Fiber Fabric)

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) นำผ้าทอที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพมาทำการแวคคัม อินฟิวชั่น

- 2) นำผ้าทอวางบนโมลด์กระจกแล้ววางชั้นต่อมาด้วยฟิลพายด้านบนของผ้าทอ ชั้นต่อมาวางด้วยตาข่าย ติดซีลแลนท์เทปรอบขอบโมลด์เพื่อเป็นซีลสุญญากาศ
- 3) นำท่อสไปรอลมาติดไว้ 2 ด้าน (บน-ล่างของชิ้นงาน)
- 4) ซีลด้วยแบ็กกิ้งฟิล์ม ในชั้นตอนนี้ต้องแน่ใจว่าไม่มีรอยรั่วซึมของอากาศ เพื่อให้ชิ้นงานมีสถานะเป็นสุญญากาศอย่างสมบูรณ์
- 5) จากนั้นนำท่อพีอีมาต่อทั้ง 2 ด้านของชิ้นงาน ด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับถั่วดักเรซิน ป้องกันไม่ให้เรซินส่วนเกินไหลเข้าปั๊มแวกคัม และอีกด้านหนึ่งต่อกับถั่วที่ผสมเรซินไว้ เพื่อเป็นตัวนำพาสารดูดเข้าไปในชิ้นงาน
- 6) ทำการผสมเรซินระหว่าง Part A และ Part B เข้าด้วยกันในอัตราส่วน 100 : 35
- 7) หลังจากนั้นเปิดปั๊มแวกคัม เรซินที่ผสมไว้จะค่อยไหลผ่านตัวชิ้นงานช้าๆ จนกระจายทั่วชิ้นงาน จากนั้นนำซีลแคลมป์มาหมุนปิดที่ท่อพีอีทั้ง 2 ด้าน เพื่อป้องกันอากาศเข้าสู่ชิ้นงาน
- 8) รอเรซินแข็งตัว 24 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานแข็งตัวดีแล้ว ทำการแกะโมลด์ลอกชิ้นงานออกมา
- 9) ตัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM แล้วนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทก

3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test)

3.3.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Tester)
- 2) ตัวอย่างชิ้นงาน (Specimen Sample)



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Tester)

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ตัดชิ้นงานที่จะทดสอบให้ได้มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM ที่ใช้ทดสอบ วางด้านยาวของชิ้นงานให้ขนานในทิศทางเดียวกับเครื่องทดสอบ ชิดเส้นบริเวณทั้งสองด้านของชิ้นงานเพื่อกำหนดตำแหน่งในการจับยึดของค้ำจับทั้งสองด้าน
- 2) เมื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบแล้ว ให้โหลดและยึดชิ้นงานเข้ากับแคลมป์ทั้งสองด้าน
- 3) เริ่มทดสอบ โดยค้ำจับจะขยับออกจากกันตามอัตราเร็วที่กำหนด
- 4) หยุดการทดสอบทันทีที่ชิ้นงานทดสอบแตกหักหรือแตกออก
- 5) บันทึกผลการทดสอบรวมถึงค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบรวมถึงเงื่อนไขการทดสอบ เช่น ขนาดและความหนาของชิ้นงาน อัตราเร็วในการดึง และค่าความต้านทานแรงดึง

3.4 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Test)

3.4.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester)
- 2) ตัวอย่างชิ้นงาน (Specimen Sample)



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester)

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ตัดชิ้นงานที่จะทดสอบให้ได้มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM ที่ใช้ทดสอบ
- 2) เริ่มทดสอบ ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุ โดยการกระแทกตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก และได้ผลลัพธ์ออกเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความทนทานต่อการแตกของชิ้นงาน
- 3) หยุดการทดสอบทันทีที่ชิ้นงานทดสอบเกิดความเสียหาย
- 4) บันทึกผลการทดสอบรวมถึงค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบรวมถึงเงื่อนไขการทดสอบ เช่น ขนาดและความหนาของชิ้นงาน และค่าความต้านทานแรงกระแทก

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ตารางแสดงผลการทดลอง

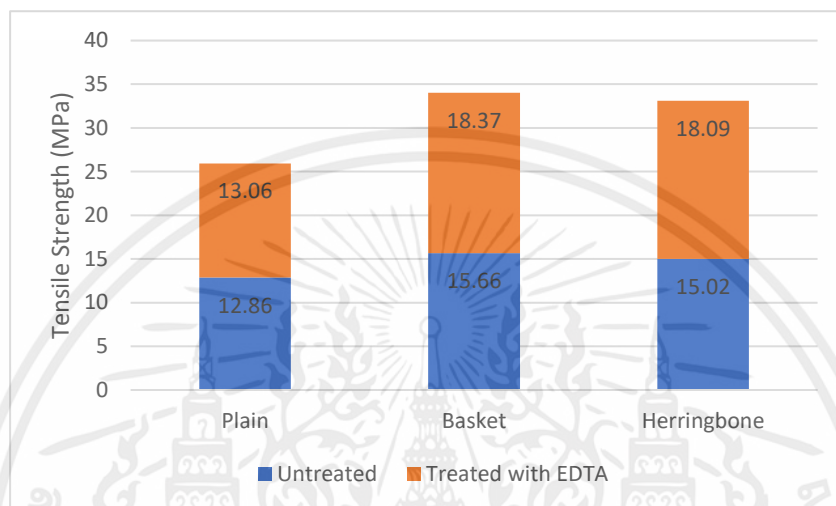
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและค่าต้านทานต่อแรงกระแทกสำหรับตัวอย่างชิ้นงานในแต่ละกรณีที่ทำกรทดสอบ

Specimen Samples	Weaving Pattern	Tensile Test		Impact Test	
		Max Force (N)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Impact Strength (kJ/m ²)	Impact Energy (J)
Untreated	Plain	321.57	12.86	-	-
	Basket	391.61	15.66	-	-
	Herringbone	375.55	15.02	-	-
Treated with EDTA	Plain	326.54	13.06	-	-
	Basket	459.14	18.37	-	-
	Herringbone	452.27	18.09	-	-
1-Layers Composites	Plain	1,152.24	46.09	13.71	11.502
	Basket	1,260.38	50.42	16.56	11.502
	Herringbone	1,217.99	48.72	15.43	11.502
2-Layers Composites	Plain	2,296.61	48.35	14.80	11.505
	Basket	2,612.66	55.00	15.08	11.505
	Herringbone	2,599.27	54.72	16.01	11.505
3-Layers Composites	Plain	2,526.27	48.69	15.30	11.509
	Basket	3,633.26	69.20	17.07	11.509
	Herringbone	3,469.01	66.08	16.57	11.509

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

4.2.1.1 การวิเคราะห์ผลของการทดสอบความต้านทานแรงดึงของผ้าทอเส้นใยกล้วยระหว่างกรณีที่ไม่มีการปรับสภาพเส้นใยด้วย EDTA และกรณีที่ผ่านมาการปรับสภาพเส้นใยด้วย EDTA



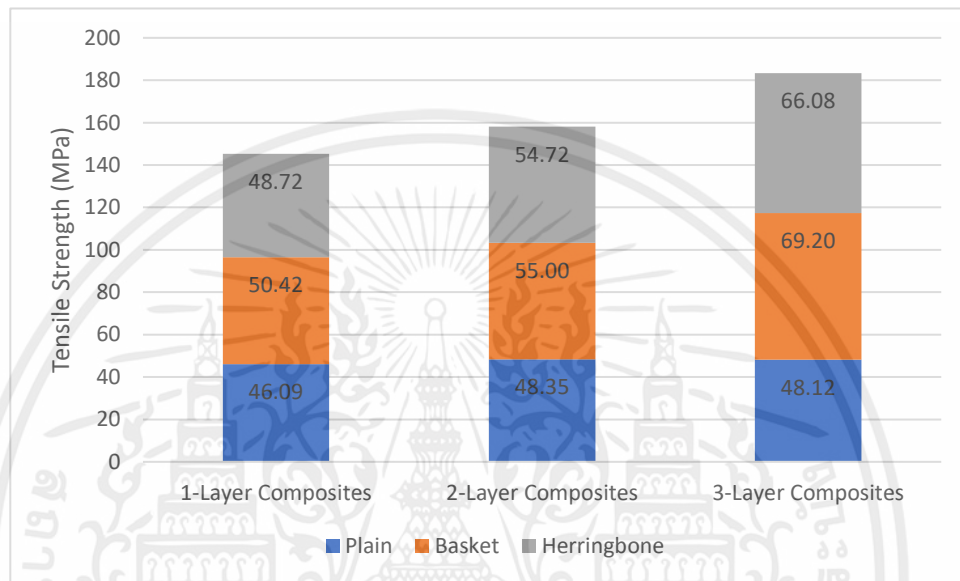
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงจากผลของการปรับสภาพด้วย EDTA

จากผลการทดลองรูปที่ 4.1 จะแสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของผ้าทอจากเส้นใยกล้วยจากผลของการปรับสภาพ (Pretreatment) ด้วยสารเคมี EDTA โดยพบว่าผ้าทอเส้นใยกล้วยทั้ง 3 รูปแบบการทอที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใยแล้ว (Treated) จะมีแนวโน้มที่ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) จะสูงกว่าผ้าทอเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใย (Untreated) อย่างเห็นได้ชัด รวมไปถึงจากรูปที่ 4.1 พบว่าผ้าทอเส้นใยกล้วยที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใยในรูปแบบลายตะกร้า (Basket) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.37 MPa ในขณะที่รูปแบบลายธรรมดา (Plain) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.06 MPa และ ในส่วนของกรณีผ้าทอเส้นใยกล้วยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใย รูปแบบลายตะกร้า (Basket) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.66 MPa ในขณะที่รูปแบบลายธรรมดา (Plain) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 12.86 MPa โดยจะเห็นได้ว่าผ้าทอเส้นใยกล้วยรูปแบบลายตะกร้า (Basket) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าการทอเส้นใยกล้วยในรูปแบบอื่นๆทั้งในกรณีที่ผ่านมาและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใย

จากผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมี EDTA จะทำให้ผ้าทอเส้นใยกล้วยมีแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น โดยเมื่อคำนวณหาร้อยละของผลต่าง (หรือ ร้อยละความเปลี่ยนแปลง) ในทุกรูปแบบการทอ พบว่า ผ้าทอในรูปแบบลายธรรมดา (Plain) มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.2 MPa หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.56% ผ้าทอในรูปแบบลายตะกร้า (Basket) มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.71 MPa หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 17.30% และผ้าทอในรูปแบบลายก้างปลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Herringbone) มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.07 MPa หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 20.44%

4.2.1.2 การวิเคราะห์ผลของการทดสอบความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตแต่ละรูปแบบการทอของเส้นใย และจำนวนชั้นของผ้าทอที่แตกต่างกันที่ผ่านการแควค้มด้วยอีพ็อกซีเรซิน



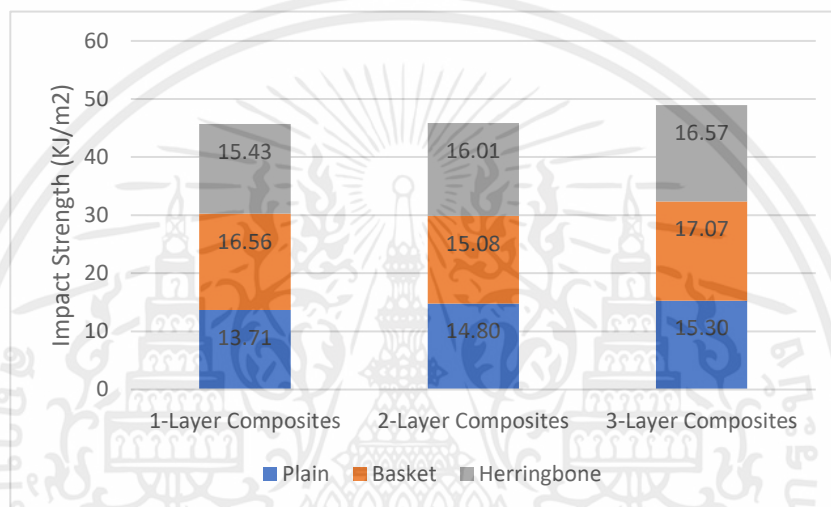
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงจากผลของรูปแบบการทอของเส้นใยและจำนวนชั้นของผ้าทอ

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 จะแสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วย จากผลของรูปแบบการทอ (Weaving Pattern) ของเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยลายธรรมดา (Plain), ลายตะกร้า (Basket) และลายก้างปลา (Herringbone) และผลของจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกันของผ้าทอตั้งแต่จำนวน 1, 2 และ 3 ชั้น โดยมีความหนาของชั้นงาน 1, 1.9 และ 2.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยพบว่าผ้าทอที่ทอในรูปแบบลายตะกร้า จะมีแนวโน้มที่ค่าความต้านทานแรงดึงจะสูงกว่าผ้าทอลายก้างปลา และลายธรรมดาตามลำดับสำหรับในทุกๆ จำนวนชั้นของผ้าที่นำมาซ้อนทับกัน รวมไปถึงยังพบอีกว่าอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิตที่เกิดจากการซ้อนทับกันของผ้าทอ 3 ชั้น จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิตที่เกิดจากการซ้อนทับกันของผ้าทอ 2 ชั้นและ 1 ชั้นอย่างเห็นได้ชัดตามลำดับ สำหรับในทุกๆ รูปแบบการทอของเส้นใย โดยการทอในรูปแบบลายตะกร้า (Basket) จำนวน 3 ชั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 69.20 MPa ในขณะที่การทอในรูปแบบลายธรรมดา (Plain) จำนวน 1 ชั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 46.09 MPa

จากการนำผ้าทอเส้นใยกล้วยมาขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวัสดุคอมโพสิต จะทำให้ผ้าทอเส้นใยกล้วยมีแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น โดยเมื่อคำนวณหาร้อยละของผลต่าง (หรือ ร้อยละความเปลี่ยนแปลง) ระหว่างจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกันของผ้าทอ 3 ชั้นและ 1 ชั้น ในทุกรูปแบบการทอ พบว่า ผ้าทอที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ้อนทับกันจำนวน 3 ชั้น จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด โดยเมื่อเทียบระหว่างผ้าทอที่ซ้อนทับกันจำนวน 3 ชั้น และ 1 ชั้น จะสังเกตได้ว่าผ้าทอในรูปแบบลายธรรมดา (Plain) มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.03 MPa หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.4% ผ้าทอในรูปแบบลายตะกร้า (Basket) มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 18.78 MPa หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 37.25% และผ้าทอในรูปแบบลายก้างปลา (Herringbone) มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 17.36 MPa หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 35.63%

4.2.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกจากผลของรูปแบบการทอของเส้นใยและจำนวนชั้นของผ้า

จากผลการทดลองรูปที่ 4.5 จะแสดงถึงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ของอีพ็อกซีเรซินคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วย จากผลของรูปแบบการทอ (Weaving Pattern) ของเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยลายธรรมดา (Plain), ลายตะกร้า (Basket) และลายก้างปลา (Herringbone) และผลของจำนวนชั้นซ้อนทับกันของผ้าทอตั้งแต่จำนวน 1, 2 และ 3 ชั้น โดยมีความหนาของชิ้นงาน 1, 1.9 และ 2.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยพบว่าผ้าทอลายตะกร้า (Basket) ที่มีการซ้อนทับกันของผ้าทอจำนวน 3 ชั้น จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.07 kJ/m² ตามมาด้วยลายก้างปลา (Herringbone) ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเท่ากับ 16.57 kJ/m² และลายธรรมดา (Plain) ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อยที่สุดเท่ากับ 15.30 kJ/m² เช่นเดียวกับในกรณีผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันจำนวน 1 ชั้น ในขณะที่ผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันจำนวน 2 ชั้น ผ้าทอลายก้างปลา (Herringbone) จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.01 kJ/m² ตามมาด้วยลายตะกร้า (Basket) ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเท่ากับ 15.08 kJ/m² และลายธรรมดา (Plain) ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อยที่สุดเท่ากับ 14.80 kJ/m² ตามลำดับ

จากการนำผ้าทอเส้นใยกล้วยงมาขึ้นรูปขึ้นงานเป็นวัสดุคอมโพสิต จะทำให้ผ้าทอเส้นใยกล้วยงมี
แนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงกระทำที่สูงขึ้น โดยเมื่อคำนวณหาร้อยละของผลต่าง (หรือ ร้อยละความ
เปลี่ยนแปลง) ระหว่างจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกันของผ้าทอ 3 ชั้นและ 1 ชั้น ในทุกรูปแบบการทอ พบว่า ผ้าทอที่
ซ้อนทับกันจำนวน 3 ชั้น จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระทำสูงที่สุด โดยเมื่อเทียบระหว่างผ้าทอที่ซ้อนทับ
กันจำนวน 3 ชั้น และ 1 ชั้น จะสังเกตได้ว่าผ้าทอในรูปแบบลายธรรมดา (Plain) มีค่าความต้านทานต่อแรง
กระทำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.59 kJ/m^2 หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 11.59% ผ้าทอในรูปแบบลาย
ตะกร้า (Basket) มีค่าความต้านทานต่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.51 kJ/m^2 หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้น
เท่ากับ 3.08% และผ้าทอในรูปแบบลายก้างปลา (Herringbone) มีค่าความต้านทานต่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น
เท่ากับ 1.14 kJ/m^2 หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 7.39%



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุประกอบเรซินและเส้นใยแก้วง สำหรับการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน

5.1 สรุปผลการวิจัย

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุน จากวัสดุคอมโพสิต อีพ็อกซีเรซินโดยอาศัยวัสดุเสริมแรงจากเส้นใยแก้วงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเสื้อเกราะกันกระสุน (Hemp Fiber-Reinforced Composites) โดยจะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยแก้วง ได้แก่ ผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วยกรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic Acid ; EDTA), รูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใย ซึ่งทำการศึกษารูปแบบการทอ (Weaving Pattern) ของเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ประกอบไปด้วยลายธรรมดา (Plain), ลายตะกร้า (Basket) และลายก้างปลา (Herringbone) และจำนวนชั้นการซ้อนทับกันของเส้นใย ซึ่งทำการศึกษาจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกันของผ้าทอ ตั้งแต่จำนวน 1, 2 และ 3 ชั้นตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) พบว่าหลังจากการปรับสภาพเส้นใยด้วย EDTA ผ้าทอทั้งสามรูปแบบมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผ้าทอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยค่าความต้านทานแรงดึงของผ้าทอทั้ง 3 รูปแบบที่ผ่านการปรับสภาพแล้วคือ 13.06, 18.37 และ 18.09 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผ้าทอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพคือ 12.86, 15.66 และ 15.02 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการปรับสภาพเส้นใยเป็นกระบวนการโดยใช้สารเคมี (Chemical Treatments) เพื่อกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส (Cellulosic Components) ออกจากเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งก็คือเพกติน (Pectin) สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดเพกตินในเส้นใยธรรมชาติที่ใช้กัน อย่างแพร่หลาย คือ EDTA การกำจัดเพกตินเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากทำหน้าที่เสมือนกาวในการยึดเส้นใยเดี่ยวเข้าด้วยกัน ดังนั้นการกำจัดเพกตินจึงช่วยเพิ่มการเกิดชั้นของเส้นใยเดี่ยวให้มีลักษณะการเรียงตัวเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยเสริมความแข็งแรงและประสิทธิภาพของเส้นใยมากขึ้นจึงเป็นผลให้ผ้าทอเส้นใยที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใย (Untreated) ต่ำกว่าผ้าทอเส้นใยที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเส้นใยแล้ว (Treated) เมื่อเส้นใยผ่านการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการปรับสภาพด้วย EDTA แล้ว จากนั้นจะนำผ้าทอเส้นใยแก้วงมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงสำหรับการนำไปทำเป็นแผ่นเกราะกันกระสุน โดยจะศึกษาจำนวนการซ้อนทับกันของเส้นใยทั้ง 3 รูปแบบการทอ คือ ลายธรรมดา 1 ชั้น, ลายตะกร้า 1 ชั้น, ลายก้างปลา 1 ชั้น, ลายธรรมดา 2 ชั้น, ลายตะกร้า 2 ชั้น, ลายก้างปลา 2 ชั้น, ลายธรรมดา 3 ชั้น, ลายตะกร้า 3 ชั้น และลายก้างปลา 3 ชั้น โดยผลที่ได้จากการทดสอบได้ค่าความต้านทานแรงดึง คือ 46.09, 50.42, 48.72, 48.35, 55.00, 54.72, 48.69, 69.20 และ 66.08 MPa ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผ้าทอลายตะกร้ามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ตามด้วยลายก้างปลาและลายธรรมดาตามลำดับ และผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันของเส้นใยจำนวน 3 ชั้นมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ตามด้วย 2 ชั้น และ 1 ชั้น เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นและ 1 ชั้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการจับติดกันของเส้นด้ายระหว่างด้ายเส้นพุ่ง (Warp Direction) และเส้นยืน (Weft Direction) ของลายตะกร้าน้อยกว่าอีก 2 รูปแบบ ซึ่งส่งผลให้มีการกระจายความเค้นอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Stress Distribution) และเป็นผลให้มีค่าแรงดึงสูงสุดมากกว่ารูปแบบการทออื่นๆ ในทางกลับกัน การทอแบบลายก้างปลาและลายธรรมดาจะเกิดการจับกันระหว่างเส้นด้าย 2 ทิศทางที่สูงกว่า ซึ่งจะสร้างความเค้นที่มากกว่าและส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงน้อยลงตามลำดับ สำหรับจำนวนชั้นของผ้าทอที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเช่นกัน โดยหากจำนวนชั้นของผ้าทอ (Number of Layer) มากขึ้น ปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต (Density) ก็จะมีมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถถ่ายโอนความเค้นและถ่ายเทน้ำหนักได้มากขึ้น ดังนั้นจึงมีความแข็งแรงมากกว่า เป็นไปตามค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นผ้าทอที่ซ้อนทับกัน 3 ชั้นจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ตามด้วย 2 ชั้นและ 1 ชั้นลดลงตามลำดับ โดยสรุปแล้วผ้าทอลายตะกร้า (Basket) จากเส้นใยกล้วยงที่ผ่านการปรับสภาพเส้นใย (Pretreatment) ด้วย EDTA แล้วและนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงโดยนำมาซ้อนทับกันจำนวน 3 ชั้น มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

ในส่วนของผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก ก็มีการศึกษาจำนวนการซ้อนทับกันของเส้นใยทั้ง 3 รูปแบบการทอ คือ ลายธรรมดา 1 ชั้น, ลายตะกร้า 1 ชั้น, ลายก้างปลา 1 ชั้น, ลายธรรมดา 2 ชั้น, ลายตะกร้า 2 ชั้น, ลายก้างปลา 2 ชั้น, ลายธรรมดา 3 ชั้น, ลายตะกร้า 3 ชั้น และลายก้างปลา 3 ชั้น โดยผลที่ได้จากการทดสอบได้ค่าความต้านทานต่อการกระแทก คือ คือ 13.71, 16.56, 15.43, 14.80, 15.08, 16.01, 15.30, 17.01 และ 16.57 kJ/m² ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผ้าทอลายตะกร้าที่มีการซ้อนทับกันของผ้าทอจำนวน 3 ชั้น จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด ตามมาด้วยลายก้างปลาและลายธรรมดา เช่นเดียวกับผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันจำนวน 1 ชั้น ทั้งนี้เนื่องจากลายตะกร้าที่มีการซ้อนทับของผ้า 3 ชั้น จะมีการจับติดกันของเส้นด้ายระหว่างด้ายเส้นพุ่ง และ เส้นยืน น้อยกว่าอีก 2 รูปแบบ ซึ่งส่งผลให้มีการกระจายความเค้นอย่างสม่ำเสมอ จึงเป็นผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ในทางกลับกัน การทอแบบลายก้างปลาและลายธรรมดาจะเกิดการจับกันระหว่างเส้นด้าย 2 ทิศทางที่สูงกว่า ซึ่งจะสร้างความเค้นที่มากกว่าและส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการกระแทกน้อยลงตามลำดับ ในขณะที่หากจำนวนชั้นของการซ้อนทับกันของผ้ามีน้อยชิ้นเท่าไร จะยิ่งทำให้การถ่ายเทความเค้นของคอมโพสิตเกิดขึ้นไม่ดี และเกิดความเสียหายเมื่อถูกแรงกระแทกได้ง่ายขึ้น ในทางกลับกัน ผ้าทอที่มีการซ้อนทับกันจำนวน 2 ชั้น ลายก้างปลามีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าลายตะกร้า และลายธรรมดา ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนของผู้ทดสอบ และเครื่องมือ ทั้งในส่วนของการเตรียมชิ้นงาน ไปจนถึงกระบวนการทดสอบชิ้นงาน ซึ่งจากที่กล่าวมาอาจเป็นผลให้ผลการทดลองที่ได้ในกรณีนี้คลาดเคลื่อนไปจากข้อมูลที่ศึกษาก่อนหน้านี้ได้

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Test) จะได้ค่าของพลังงานแรงกระแทกของลูกตุ้มแกว่งที่กระแทกชิ้นงานจากการทดสอบ (Impact Energy) มีค่าประมาณใกล้เคียง 11.5 จูลในทุกรณี ดังนั้นการเปรียบเทียบจำนวนชั้นที่ต้องใช้ในการรับแรงกระแทกของลูกกระสุนปืน จึงจะพิจารณากรณีที่ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงสุดด้วย ซึ่งเป็นผลให้ในการทดลองนี้จึงนำกรณีของผ้าทอลายตะกร้า (Basket) และซ้อนทับกันจำนวน 3 ชั้นมาใช้ในการคำนวณ โดยการกระแทกของลูก

กระสุนปืนประเภท 9 mm Parabellum ซึ่งมีความเร็วแรงกระแทกเฉลี่ยอยู่ที่ 420 เมตร/นาทีก และมีค่าพลังงานแรงกระแทกอยู่ที่ 600 จูล ^[37] ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณหาจำนวนชั้นของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าต้องใช้คอมโพสิตแบบ 3 ชั้นจำนวนประมาณ 53 ชุด หรือประมาณ 157 ชั้น (ความหนา รวม 109.57 มิลลิเมตร) ถึงจะสามารถทนแรงกระแทกของลูกกระสุนปืนดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามจะต้องใช้จำนวนชั้นที่มากขึ้นไปสำหรับแผ่นเกราะกันกระสุนดังกล่าว จากการศึกษางานวิจัยพบว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวัสดุคอมโพสิตได้ด้วยการใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วนี้ได้มากยิ่งขึ้น โดยจะสามารถศึกษาต่อได้เพิ่มเติมในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวัสดุคอมโพสิตนี้และทำให้ใช้จำนวนชั้นได้ลดลง หรือความหนาลดลงได้ อ้างอิงจากงานวิจัยที่ 2.11.4 สำหรับในการพัฒนาการออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรทำการทอเส้นใยแก้วในแนวเส้นยืน (Warp Direction) ด้วย
- 5.2.2 ควรทำการทอผ้าให้มีลายออกมาในหลากหลายรูปแบบเพิ่มมากขึ้น
- 5.2.3 ควรมีขนาดชิ้นงานในการทดสอบหลากหลายขนาดมากขึ้น
- 5.2.4 ควรทำชิ้นงานให้มีจำนวนหลายๆ ชั้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] เสื้อเกราะกันกระสุน. แหล่งที่มา <https://www.safetylifethailand.com/download/เสื้อเกราะกันกระสุน.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2566
- [2] Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison แหล่งที่มา <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/9/1920> สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2566
- [3] มาตรฐาน NIJ 0101.06. แหล่งที่มา <https://guodunarmor.com/th>. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2566
- [4] เสื้อเกราะกันกระสุน. แหล่งที่มา <https://www.mtts.ac.th/mtts4/assets/pdf/เสื้อเกราะกันกระสุนสายพันธุ์ใหม่.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2566
- [5] การพัฒนาแผ่นเกราะเชิงประกอบโดยใช้วัสดุเซรามิก/เส้นใย/โลหะ. แหล่งที่มา <https://www.tsme.org/index/phocadownload/MENETT25/25AEC/development%20of%20ceramic%20fabric%20metal%20composite%20armour%20systemaec14.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2566
- [6] ระบบแวคคัม (Infusion). แหล่งที่มา แวคคัม/อินฟิวชั่น - การทำงานไฟเบอร์กลาส (Infusion) - jn-transos. สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2566
- [7] Infusion คืออะไร. แหล่งที่มา Infusion คืออะไร ทำความรู้จักก่อนทำงาน Vacuum infusion(resinsjthailand.com) สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2566
- [8] Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. แหล่งที่มา [2aa7bc89034f4a5ea4617e2ae0ba553a.pdf](https://www.jishulink.com/2aa7bc89034f4a5ea4617e2ae0ba553a.pdf) (jishulink.com). สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566
- [9] ผลของชนิดเส้นใยและโครงสร้างการทอต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ. แหล่งที่มา <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9014/1/369961.pdf>. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566
- [10] คุณสมบัติทางกลของวัสดุประกอบจากเส้นใยปอสำหรับใช้ในงานซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต. แหล่งที่มา file:///C:/Users/UNS_CT/Downloads/KC5611003.pdf. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566
- [11] Characterization of natural fiber and composites – A review. แหล่งที่มา https://www.researchgate.net/publication/277473267_Characterization_of_natural_fiber_and_composites_-_A_review สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566
- [12] Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications แหล่งที่มา <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/1/202> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566

- [13] สูตรการคำนวณหากำลังรับแรงดึงสูงสุด. แหล่งที่มา <https://sites.google.com/a/ubu.ac.th/tobchai-janyakorn-> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566
[5613401376/?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1](https://sites.google.com/a/ubu.ac.th/tobchai-janyakorn-5613401376/?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1). สืบค้น
เมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2566
- [14] Stress/ความเค้น. แหล่งที่มา [https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2540/stress-](https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2540/stress-%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B9%89%E0%B8%99)
[%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B9%89%E0%B8%99](https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2540/stress-%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B9%89%E0%B8%99). สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2566
- [15] การทดสอบวัสดุ. แหล่งที่มา [https://www.thaiparker.co.th/th/articles/laboratory-](https://www.thaiparker.co.th/th/articles/laboratory-services/materials-mechanical-chemical-physical-testing)
[services/materials-mechanical-chemical-physical-testing](https://www.thaiparker.co.th/th/articles/laboratory-services/materials-mechanical-chemical-physical-testing). สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2566
- [16] เส้นใยธรรมชาติเพื่อการพัฒนาสิ่งทอ. แหล่งที่มา [https://www.sacit.or.th/uploads/items/attachments/fb3f76858cb38e5b7fd113e0bc1c0721/_1](https://www.sacit.or.th/uploads/items/attachments/fb3f76858cb38e5b7fd113e0bc1c0721/_1e9bd3aebc9745ffeaa7e9a6bf46f1aa.pdf)
[e9bd3aebc9745ffeaa7e9a6bf46f1aa.pdf](https://www.sacit.or.th/uploads/items/attachments/fb3f76858cb38e5b7fd113e0bc1c0721/_1e9bd3aebc9745ffeaa7e9a6bf46f1aa.pdf). สืบค้นเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2566
- [17] Targeted Pre-Treatment of Hemp Fibers and the Effect on Mechanical Properties of Polymer Composites. แหล่งที่มา <https://www.mdpi.com/2079-6439/11/5/43>. สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2566
- [18] การทดสอบ ASTM D7136 เพื่อวัดความต้านทานความเสียหายของเมทริกซ์พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยไฟเบอร์ ต่อการตกกระแทกของน้ำหนัก. แหล่งที่มา [https://www.laboratuar.com/th/sekorel/astm-](https://www.laboratuar.com/th/sekorel/astm-testleri/astm-d7136-elyaf-takviyeli-polimer-matris-kompozitinin-dusen-agirlik-darbe-olayina-karsi-hasar-direncini-olcmek-icin-test/)
[testleri/astm-d7136-elyaf-takviyeli-polimer-matris-kompozitinin-dusen-agirlik-darbe-olayina-karsi-hasar-direncini-olcmek-icin-test/](https://www.laboratuar.com/th/sekorel/astm-testleri/astm-d7136-elyaf-takviyeli-polimer-matris-kompozitinin-dusen-agirlik-darbe-olayina-karsi-hasar-direncini-olcmek-icin-test/). สืบค้นเมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน 2566
- [19] การทดสอบตาม ASTM D3039 เพื่อทดสอบแรงดึงของโพลีเมอร์และคอมโพสิต. แหล่งที่มา [https://www.laboratuar.com/th/testler/astm-testleri/astm-d3039-polimer-ve-kompozit-](https://www.laboratuar.com/th/testler/astm-testleri/astm-d3039-polimer-ve-kompozit-cekme-testleri/)
[cekme-testleri/](https://www.laboratuar.com/th/testler/astm-testleri/astm-d3039-polimer-ve-kompozit-cekme-testleri/) สืบค้นเมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน 2566
- [20] การแยกเส้นใยกัญชง. แหล่งที่มา [https://dspace.rmutk.ac.th/bitstream/handle/123456789/2308/Prasong_2018.pdf?sequence=1](https://dspace.rmutk.ac.th/bitstream/handle/123456789/2308/Prasong_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
[&isAllowed=y](https://dspace.rmutk.ac.th/bitstream/handle/123456789/2308/Prasong_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y) สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2566
- [21] Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics. แหล่งที่มา <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1528083716679157> สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2566
- [22] Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibers on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. แหล่งที่มา <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X16302937> สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2566

- [23] พอลิเมอร์คอมโพสิต. แหล่งที่มา https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2547/ichem1047nk_ch1.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2566
- [24] สมบัติทั่วไปของ Epoxy EPOTEC YD 535LV และ Hardener TH7253. แหล่งที่มา <https://neo.co.th/en> สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2566
- [25] ประเภทของวัสดุผสม. แหล่งที่มา [http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo\(501\).pdf](http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo(501).pdf) สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2566
- [26] โครงสร้างของอีพ็อกซี แหล่งที่มา https://th.m.wikipedia.org/wiki/ไฟล์:Epoxy_prepolymer_chemical_structure.png สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2566
- [27] คุณสมบัติทางเคมีของกัญชง. แหล่งที่มา <http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/research/poster/kps61/kukps2561-05.pdf> สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2566
- [28] Tensile test specimen dimensions according to the (ASTM D3039). แหล่งที่มา https://www.researchgate.net/figure/Tensile-test-specimen-dimensions-according-to-the-ASTM-D3039_fig1_349903680 สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2566
- [29] Designation: D 3039/D 3039M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567
- [30] การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test). แหล่งที่มา [http://old-book.ru.ac.th/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-8.pdf](http://old-book.ru.ac.th/e-book/m/MY318(51)/MY318-8.pdf). สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567
- [31] Izod Impact ASTM D256. แหล่งที่มา <https://www.intertek.com/polymers-plastics/testlopedia/notched-izod-impact-astm-d256/> สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567
- [32] ASTM D5034 : Tensile for fabrics แหล่งที่มา <https://www.admet.com/blog/astm-d5034-breaking-strength-and-elongation-of-textile-fabrics-how-to-guide/> สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567
- [33] Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture. แหล่งที่มา <https://www.researchgate.net/publication/310839013> สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567
- [34] Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibers on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. แหล่งที่มา <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X16302937>. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567

[35] TENSILE RESPONSES OF TREATED CISSUS POPULNEA FIBERS. แหล่งที่มา

https://www.researchgate.net/publication/322651640_Tensile_responses_of_treated_Cissus_populnea_fibers. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2567

[36] Carbon Nanotube/Epoxy Hybrid Composites: Achieving superior Mechanical Properties.

แหล่งที่มา <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/> สืบค้นเมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2567

[37] 9×19mm Parabellum. แหล่งที่มา

https://en.wikipedia.org/wiki/9%C3%9719mm_Parabellum สืบค้นเมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2567





ภาคผนวก ก.

ภาพสำหรับกระบวนการทดลองการปรับสภาพเส้นใย

การปรับสภาพเส้นใยัญชง (Pretreatment)

การปรับสภาพของเส้นใยัญชงก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ในการปรับสภาพผ้าเส้นใยัญชง

1.1 เตรียมเส้นใยัญชงในรูปแบบของผ้าทอ 3 รูปแบบในการนำไปปรับสภาพเส้นใย แสดงดังรูปที่

ก.1



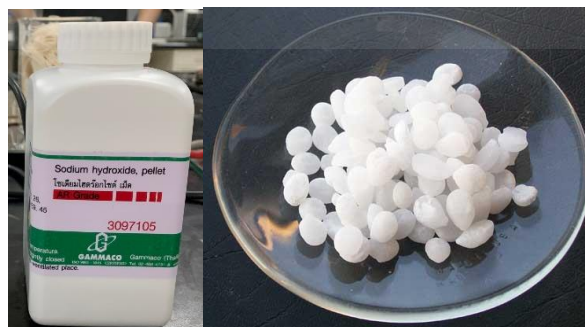
รูปที่ ก.1 แสดงขั้นตอนที่ 1.1

1.2 ชั่งสารเคมี EDTA โดยเตรียมด้วยความเข้มข้น 3%w/v แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แสดงขั้นตอนที่ 1.2

1.3 ชั่งสารเคมี NaOH โดยเตรียมด้วยความเข้มข้น 5 mol/dm³ เพื่อใช้ในการปรับค่า pH ของสารละลาย EDTA แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 แสดงขั้นตอนที่ 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ค่อยๆ หยด NaOH ลงไปเพื่อปรับค่า pH ให้อยู่ที่ประมาณ 6-7 โดยใช้กระดาษลิตมัสเพื่อวัดค่า เนื่องจาก EDTA จะไม่ละลายในน้ำ หาก pH มีค่าเป็นกรด แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 แสดงขั้นตอนที่ 1.4

2. ทำการปรับสภาพเส้นใยกัญชง

2.1 ตั้งปิกเกอร์สารละลาย EDTA ไว้บนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนแบบดิจิทัล โดยอุ่นให้ได้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปั่นกวนที่ 100 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 แสดงขั้นตอนที่ 2.1

2.2 นำผ้าทอเส้นใยกัญชงไปแช่ไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา นำผ้าเส้นใยกัญชงออกและล้างด้วยน้ำ DI แสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 แสดงขั้นตอนที่ 2.2

2.3 นำผ้าเส้นใยแก้วงเข้าสู่ตู้อบ เพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 แสดงขั้นตอนที่ 2.3





การแวกคัม อินฟิวชัน เพื่อขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Vacuum Infusion)

ผ้าทอเส้นใยแก้วที่ได้จากขั้นตอนการปรับสภาพ จะนำมาผ่านกระบวนการแวกคัม อินฟิวชัน ด้วยอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

1. การเตรียมเรซินในการทำแวกคัม

1.1 ชั่งตวงเรซิน Part A และ Part B ด้วยอัตราส่วน 100 : 35 เพื่อนำไปผสมให้เข้ากันก่อนทำการแวกคัม อินฟิวชัน แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงขั้นตอนที่ 1.1

2. ขั้นตอนการแวกคัม

2.1 นำผ้าทอที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพมาทำการแวกคัม วางบนโมลด์กระจกแล้ววางชั้นต่อมาด้วยฟิลพายด้านบนเส้นใยและวางตาข่ายทับฟิลพาย หลังจากนั้นติดซีลแลนเทปรอบขอบโมลด์ แสดงดังรูปที่ ข.2

2.2 นำท่อสุปรีโอลมาติดไว้ 2 ด้าน (บน-ล่างของชิ้นงาน) แล้วทำการซีลด้วยแบ็กกี้ฟิล์ม และติดตั้งท่อพีอี 2 ด้าน (บน-ล่างของท่อสุปรีโอล) ด้านหนึ่งต่อกับถ้วยตักเรซินและอีกด้านหนึ่งต่อไปยังถ้วยดูดสารอีพ็อกซีเรซิน แสดงดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 แสดงขั้นตอนที่ 2.1-2.2

2.3 เปิดปั๊มทำการดูดเรซินที่ทำการผสมไว้ ค่อยๆ ไหลเข้าไปในชิ้นงาน เมื่อเรซินซึมทั่วชิ้นงาน นำซีแลมป์หมุนปิดท่อพีอีทั้ง 2 และรอเรซินแข็งตัว 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 แสดงขั้นตอนที่ 2.1-2.3

2.4 ทำการแกะโมลด์ลอกชิ้นงาน และตัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM เพื่อนำไปทดสอบในขั้นต่อไป แสดงดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 แสดงขั้นตอนที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test)

การทดสอบความต้านทานแรงดึง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

- 1.1 ตัดชิ้นงานให้มีขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และความยาว 15 เซนติเมตร โดยจะทำการทดลองโดยใช้ผ้าทอทั้งหมด 3 รูปแบบ รูปแบบละ 3 ชิ้น จำนวนชิ้นงานรวมทั้งหมด 9 ชิ้น เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 แสดงขั้นตอนที่ 1.1

2. การทดสอบแรงดึง

- 2.1 ตั้งค่าเครื่อง Universal Testing Machine โดยกำหนดความเร็วในการดึงชิ้นงานของเครื่อง เท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่ออนาที และใส่ชิ้นงานที่จะทดสอบเข้ากับตัวจับชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน (บนและล่าง) แล้วเปิดเครื่องเริ่มการดึงชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 แสดงขั้นตอนที่ 2.1

2.2 เมื่อชิ้นงานเกิดการแตกหัก บันทึกค่าแรงกระทำและความยาวที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน
แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 แสดงขั้นตอนที่ 2.2



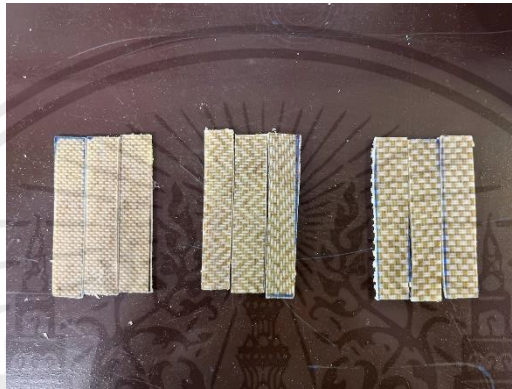
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength Test)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

1.1 ตัดชิ้นงานให้มีขนาดความกว้าง 1.27 เซนติเมตร และความยาว 6.35 เซนติเมตร โดยจะทำการทดลองโดยใช้ผ้าทอทั้งหมด 3 รูปแบบ รูปแบบละ 3 ชิ้น จำนวนชิ้นงานรวมทั้งหมด 9 ชิ้น เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 แสดงขั้นตอนที่ 1.1

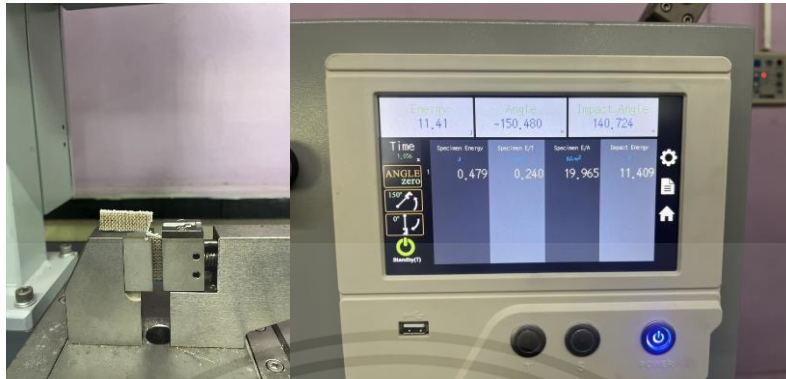
2. ทดสอบแรงกระแทก

2.1 ตั้งค่าเครื่อง Impact Test โดยกำหนดความยาวของชิ้นงานของเครื่อง เท่ากับ 1.27 เซนติเมตร โดยองศาการแกว่งของลูกตุ้ม 150 องศา และใส่ชิ้นงานที่จะทดสอบเข้ากับตัวจับชิ้นงาน แล้วทำการกด Start เพื่อเริ่มทำการแกว่งให้กระแทกชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 แสดงขั้นตอนที่ 2.1

2.2 เมื่อชิ้นงานเกิดการแตกหัก บันทึกค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน แสดงดังรูป
ที่ ง.3



รูปที่ ง.3 แสดงขั้นตอนที่ 2.2

