



การศึกษาความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรง

ด้วยเส้นใยมะพร้าว

A STUDY OF TENSILE STRENGTH OF COMPOSITE MATERIAL REINFORCED
WITH COCONUT FIBER

นายกฤษฎา	ชินโน	รหัสนิติ	53361788
นายณัฐนนท์	ศรีสุขวัฒน์กุล	รหัสนิติ	53361962
นายปริญญา	วิสิฐพงศ์พันธ์	รหัสนิติ	53362082

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 20 ก.ค. 2558
เลขทะเบียน..... 16911011
เลขเรียกหนังสือ..... 16
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๑๒๙๐ ๑ 2556

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีการศึกษา 2556



ใบรับรองโครงการ

หัวข้อโครงการ : การศึกษาความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว
A study of tensile strength of composite material reinforced with coconut fiber

ผู้ดำเนินโครงการ : นายกฤษฏา ชินโน รหัสบัณฑิต 53361788
นายณัฐนนท์ ศรีสุขวัฒน์กุล รหัสบัณฑิต 53361962
นายปริญญา วิสิฐพงศ์พันธ์ รหัสบัณฑิต 53362082

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.ศลิษา วีรพันธุ์
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ศลิษา วีรพันธุ์)

.....กรรมการ
(ดร.ภาณุ พุทธวงศ์)

.....กรรมการ
(ดร.สุเมธ เหมะวิฒนะชัย)

หัวข้อโครงการ : การศึกษาความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้น
ใยมะพร้าว
A study of tensile strength of composite material reinforced
with coconut fiber

ผู้ดำเนินโครงการ : นายกฤษฎา ชินโน รหัสนิสิต 53361788
นายณัฐนนท์ ศรีสุขวัฒนกุล รหัสนิสิต 53361962
นายปริญญา วิสิฐพงศ์พันธ์ รหัสนิสิต 53362082

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.ศลิษา วีรพันธ์
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2556

บทคัดย่อ

การทดสอบในโครงการจะขึ้นรูปโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมะพร้าวโดยใช้วิธีการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D3039 ได้แบ่งการทดสอบออกเป็นโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น และโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว จากการวิเคราะห์หาค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยชนิดสั้นด้วยรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์พบว่า เส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 1.37 mm เมื่อขึ้นรูปและเขียนรหัสชิ้นงานเสร็จแล้ว นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายรูปแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ และทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) พบว่าโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความต้านทานแรงดึงมากที่สุดคือ วัสดุผสมแบบ SS20 ($V_f = 47.89\%$) มีความต้านทานแรงดึง 19.48 MPa และโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นที่มีค่ามอดุลัสแรงดึงมากที่สุดคือ วัสดุผสมแบบ SM20 ($V_f = 32.50\%$) มีค่ามอดุลัสแรงดึงเท่ากับ 34.61 MPa สำหรับโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวที่มีความต้านทานแรงดึงมากที่สุดคือ วัสดุผสมแบบ LLO ($V_f = 80.66\%$) มีความต้านทานแรงดึง 45.43 MPa และโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวที่มีค่ามอดุลัสแรงดึงมากที่สุด คือ วัสดุผสมแบบ LS1 ($V_f = 53.09\%$) มีค่ามอดุลัสแรงดึงเท่ากับ 31.86 MPa ทั้งนี้วัสดุผสมที่ได้ทำการทดลองในโครงการนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในงานที่มีการรับแรงดึงไม่เกิน 45.43 MPa และเป็นแนวทางในการศึกษาโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากธรรมชาติต่อไป

Project Title : A study of tensile strength of composite material reinforced with coconut fiber
Name : Mr.Kritsada Chinno
Mr.Nuttanon Srisookwatanukul
Mr.Parinya Wisitpongpan
Project Advisor : Dr.Salisa Veerapun
Academic Year : 2013

Abstract

In this project, a study of tensile strength of composite material reinforced with coconut fiber was performed following ASTM D3039 guidance. The experiment considered alteration of tensile strength of composite material due to variation of the fiber reinforcement involving randomly distributed short fiber and longitudinal aligned long fiber. Chopped fibers of 1.37 mm in average were used in the short fiber reinforcement. The fiber had three diameter alteration; 0.49 mm, 0.59 mm and 0.76 mm respectively. The amount of fiber reinforcement varied, approximately, from 20% to 70% by volume. The pictures of the composite material were taken and analyzed to determine a ratio of fiber in the material. The tensile strength was examined by Universal Testing Machine. The result shows that composite material with long fiber reinforcement provides higher tensile strength comparing to those reinforced with short fiber. The composite material with long fiber name LS0 was approximate to the composite material with short fiber name SS60 by V_f . The results show that maximum stress of LS0 was 35.61 MPa and maximum tensile modulus was 25.74 MPa provides higher tensile strength comparing to those reinforced with short fiber name SS60 that maximum stress was 13.64 MPa and maximum tensile modulus was 22.63 MPa.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ ดร.ศลิษา วีรพันธุ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ทศพล ตริ์จวิธาพงศ์ ที่สั่งสอน และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีในเรื่องของการใช้เครื่องมือและการวิเคราะห์ต่างๆในโครงการ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจ จนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายกฤษฎา ชินโน
นายณัฐนนท์ ศรีสุขวัฒน์กุล
นายปริญญญา วิสิฐพงศ์พันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	5
2.1 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.2 วัสดุผสม	7
2.3 โพลีเอสเตอร์เรซิน	17
2.4 เส้นใยธรรมชาติจากมะพร้าว	19
2.5 สมบัติเชิงกลของวัสดุ	23
2.6 การทดสอบแรงดึง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	29
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	29
3.2 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์	30
3.3 การทำแบบขึ้นรูป (Mold)	30
3.4 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว	31
3.5 การผสมโพลีเอสเตอร์เรซิน	33
3.6 การขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซิน	34
3.7 สร้างรหัสชิ้นงาน	35
3.8 การคำนวณหาอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงาน	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.9 การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง	39
3.10 การวิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	44
4.1 การหาอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในวัสดุผสม	44
4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง	46
- โพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง	
- เส้นใยมะพร้าว	
- วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น	
- วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว	
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	52
5.1 วิเคราะห์อัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม	52
5.2 ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าว	54
5.3 ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น	56
5.4 ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว	66
5.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นและเส้นใยชนิดยาว	73
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	76
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน	76
6.2 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ	77
6.3 ผลของฟองอากาศต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสม	78
6.3 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้จัดทำ	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของคอมโพลีเมอร์แรงดึงด้วยเส้นใยบางชนิด	15
ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมื่อมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยและทิศทางของความเค้นต่างกัน	17
ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิคาร์บอนเนตทั้งแบบที่ไม่เสริมแรง และเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นระเบียบ	17
ตารางที่ 2.4 ประโยชน์ที่ได้จากมะพร้าว	20
ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมะพร้าว	32
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในวัสดุผสม	45
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าว	47
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น	48
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว	50
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเฉลี่ยตัวแปรต่างๆของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น	52
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว	53
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยมอดูลัสของเส้นใยมะพร้าวและโพลีเอสเตอร์เรซิน	54
ตารางที่ 5.4 แสดงค่า K ของวัสดุผสมแต่ละชิ้นและค่า K เฉลี่ยของวัสดุผสม	58
ตารางที่ 5.5 ค่าความยาววิกฤตของเส้นใยขนาด S, M และ L	60
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการประมาณด้วยสมการและความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง	67
ตารางที่ 5.7 แสดงค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวและค่าความคลาดเคลื่อน	69
ตารางที่ 5.8 ค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม ความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นและเส้นใยชนิดยาว	74

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัสดุผสม (Composite Material)	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุผสม ได้แก่ ความเข้มข้น ขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัว	8
รูปที่ 2.3 แผนผังการแบ่งประเภทวัสดุผสม	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_f และความของเส้นใย (l) เมื่อ (ก) $l < l_c$ (ข) $l = l_c$ (ค) $l > l_c$	12
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ แบบต่างๆ (ก) เส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน (ข) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน และ (ค) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ	12
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เมทริกซ์ และคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อทิศทางการให้ แรงขนานกับเส้นใย	13
รูปที่ 2.7 โพลีเอสเทอร์เรซิน	18
รูปที่ 2.8 การแข็งตัวของโพลีเอสเทอร์เรซิน	19
รูปที่ 2.9 ก้านใบของมะพร้าว	22
รูปที่ 2.10 มะพร้าว : เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ 10 อันดับแรกปี 2552-2554	22
รูปที่ 2.11 เนื้อที่ ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาค และรายจังหวัด ปี 2553-2555	23
รูปที่ 2.12 แสดงระยะยึดของแท่งโลหะทรงกระบอกที่รับแรงดึงทางเดียวF (a) แท่งวัสดุที่ไม่ได้รับแรง (b) แท่งวัสดุรับแรงดึงทางเดียวF	25
รูปที่ 2.13 กราฟแรงเค้นความเครียด	27
รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	28
รูปที่ 3.1 แบบขึ้นรูปที่พร้อมใช้งาน	31
รูปที่ 3.2 ก้านใบของมะพร้าว	31
รูปที่ 3.3 เส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นขนาด S M และ L	32
รูปที่ 3.4 เส้นใยมะพร้าวชนิดยาวขนาด S M และ L	33
รูปที่ 3.5 การผสมโพลีเอสเทอร์เรซิน	33
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงานโพลีเอสเทอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง	34

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น	34
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว	35
รูปที่ 3.9a วิธีการเขียนรหัสชิ้นงาน	35
รูปที่ 3.9b ตัวอย่างรหัสชิ้นงาน	36
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างรูปภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์	36
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างรูปภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ	37
รูปที่ 3.12 กำหนดขอบเขตของรูป	38
รูปที่ 3.13 กำหนดขอบเขตของการวัด	38
รูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์จากรูป	39
รูปที่ 3.15 เครื่อง Universal Testing Machine	39
รูปที่ 3.16 โปรแกรม NEXYGEN Plus และ EZ Plus Series Software Console	40
รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ติดตั้งกับเครื่อง Universal Testing Machine	40
รูปที่ 3.18 กำหนดขนาดของชิ้นงาน	41
รูปที่ 3.19 กำหนดค่าที่ต้องการจะใช้งาน	42
รูปที่ 3.20 วัสดุผสมที่ขาดออกจากกันเมื่อได้รับแรงดึง	42
รูปที่ 4.1 ลักษณะภาพตัดขวางชิ้นงานของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว	44
รูปที่ 4.2(a) อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นในวัสดุผสม	45
รูปที่ 4.2(b) อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวในวัสดุผสม	46
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซิน และเส้นใยมะพร้าวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49 mm 0.59 mm และ 0.76 mm	47
รูปที่ 4.4 โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น อัตราส่วนระหว่างเส้นใย และโพลีเอสเตอร์เรซิน 20%, 40% และ 60%	49
รูปที่ 4.5 โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว แบ่งตามระยะห่าง ของเส้นใยมะพร้าวตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แบ่งเป็นแบบเรียงชิด เรียงห่าง 1 เส้น และห่าง 2 เส้น	51
รูปที่ 5.1a ความสัมพันธ์ระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยเมื่อรับแรงดึงจากทฤษฎี	54
รูปที่ 5.1b ความสัมพันธ์ระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยเมื่อรับแรงดึงจากการทดลอง	55

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น อัตราส่วนระหว่างเส้นใยและโพลีเอสเตอร์เรซิน 20%, 40% และ 60%	56
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของการเสริมแรงและค่าอัตราส่วนของเส้นใยชนิดสั้นในวัสดุผสม	59
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และสเกลในการวัด	61
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาววิกฤตที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเค้นสูงสุดของเมทริกซ์และเส้นใย	61
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาววิกฤตที่เปลี่ยนแปลงไปกับค่ามอดูลัสของเมทริกซ์และเส้นใย	62
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง	63
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง	64
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนเส้นใยสั้นในวัสดุผสม	65
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและค่าอัตราส่วนเส้นใยสั้นในวัสดุผสม	65
รูปที่ 5.11 คุณลักษณะของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว, โพลีเอสเตอร์เรซิน และเส้นใยมะพร้าวขนาดต่างๆ	66
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและขนาดของเส้นใย	68
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและขนาดของเส้นใย	70
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนเส้นใยยาวในวัสดุผสม	71
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและค่าอัตราส่วนเส้นใยยาวในวัสดุผสม	72
รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว	75

สารบัญสัญลักษณ์

A	พื้นที่ด้านบนที่ถูกแรงเฉือนกระทำ
A_0	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
A_c	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุผสม
A_f	พื้นที่หน้าตัดของเส้นใย
A_m	พื้นที่หน้าตัดของเมทริกซ์
D	ความยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมของชิ้นทดสอบ
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง
E	ค่ามอดุลัส
E_c	ค่ามอดุลัสของวัสดุผสมจากการทดลอง
E_{cd}	ค่ามอดุลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น
E_{cd}	ค่ามอดุลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว
E_f	ค่ามอดุลัสของเส้นใย
E_m	ค่ามอดุลัสของเมทริกซ์
F	แรงกระทำ
F_c	แรงที่คอมโพสิตรองรับ
F_m	แรงที่เมทริกซ์รองรับ
F_f	แรงที่เส้นใยรองรับ
K	ประสิทธิภาพของการเสริมแรง
L	ความยาวของชิ้นทดสอบ
L_0	ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ
L_c	ความยาววิกฤติ
V_f	อัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม
$V_{f,ac}$	อัตราส่วนเส้นใยที่ประมาณการในวัสดุผสม
V_m	อัตราส่วนของเมทริกซ์ในวัสดุผสม

สารบัญสัญลักษณ์(ต่อ)

W	ความกว้างของหน้าตัดสี่เหลี่ยมของชิ้นทดสอบ
S	แรงเฉือน
เส้นใยขนาด S M L	เส้นใยขนาด 0.49 mm 0.59 mm และ 0.76 mm ตามลำดับ
Z	ค่าความคลาดเคลื่อน
τ_c	ค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดครากของเมทริกซ์
σ	แรงเค้น
σ_c	แรงเค้นที่คอมโพสิต
σ_f	แรงเค้นที่เส้นใย
σ_F	แรงเค้นสูงสุดของวัสดุที่จุดขาด
σ_m	แรงเค้นที่เมทริกซ์
σ'_m	ค่าความเค้นในเมทริกซ์ เมื่อเส้นใยหัก
σ_U	แรงเค้นสูงสุดของวัสดุผสมที่รับได้จากการทดลอง
σ_{cd}^*	ค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวจากการคำนวณ
σ_m^*	ค่าความเค้นสูงสุดของเมทริกซ์
σ_{cd}^*	ค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นจากการคำนวณ
σ_f^*	ความแข็งแรงสูงสุด หรือความต้านทานแรงดึงของเส้นใย
E_{ym}	ความเครียด ณ จุดครากของเมทริกซ์

สารบัญสัญลักษณ์(ต่อ)

ϵ_m^*	ความเครียดสูงสุดเมื่อเมทริกซ์แตกหัก
ϵ_f^*	ความเครียดสูงสุดเมื่อเส้นใยแตกหัก
ϵ_c	ความเครียดในวัสดุผสม
ϵ_f	ความเครียดในเส้นใย
ϵ_m	ความเครียดในเมทริกซ์



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันโพลีเมอร์คอมโพสิต (Composite Polymer) มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ในงานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงสูง ความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปได้สะดวก โดยทั่วไปในส่วนเสริมแรงมักใช้เส้นใยที่ทำจากวัสดุสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด และเส้นใยคาร์บอน ทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง และในปัจจุบันกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการศึกษาค้นคว้า เพื่อหาวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ทดแทนวัสดุสังเคราะห์ โดยการใช้เส้นใยธรรมชาติในการเสริมแรง เพราะเส้นใยธรรมชาติ เป็นอินทรีย์วัตถุที่มีปริมาณมาก น้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาถูก ทำให้เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงของโพลีเมอร์คอมโพสิต

เส้นใยจากมะพร้าวเป็นเส้นใยธรรมชาติอันหนึ่งที่กลุ่มผู้จัดทำโครงการให้ความสนใจ เนื่องจากตามสถิติจากสถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555 จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร แล้วพบว่า จังหวัดพิษณุโลกมีเนื้อที่ยืนต้นของมะพร้าวเท่ากับ 1,781 ไร่ เนื้อที่ให้ผลเท่ากับ 1,781 ไร่ ผลผลิตเท่ากับ 1,923 ตัน และผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 1,080 กิโลกรัม จากข้อมูลทางสถิติจะเห็นได้ว่ามะพร้าวเป็นพืชที่มีปลูกอยู่เป็นจำนวนมากในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งพบว่า ก้านใบของมะพร้าวแห้งเป็นส่วนที่เหลือในสวนมะพร้าวเป็นขยะให้กับเกษตรกร จากการสอบถามเจ้าสิบเอกอนันต์ มีประกอบ เกษตรกรตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก จะกำจัดด้วยวิธีการเผา

ทางกลุ่มผู้จัดทำโครงการจึงได้เกิดความคิดที่จะนำเส้นใยมะพร้าวมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงของโพลีเมอร์คอมโพสิต เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและลดปัจจัยในการทำลายสิ่งแวดล้อม และเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ (Fiber reinforced polymer)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความต้านทานแรงดึงของโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมะพร้าว

1.2.2 เพื่อเสนอทางเลือกในการผลิตโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมะพร้าว

1.3 ขอบเขตการทำโครงการ

- 1.3.1 จัดหาเส้นใยมะพร้าวจากก้านมะพร้าวเป็นเส้นใยเสริมแรง
- 1.3.2 ทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงวัสดุโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยจากก้านมะพร้าวตามมาตรฐาน ASTM D3039[1]
- 1.3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ผลการศึกษาความสามารถในการรับแรงดึงของโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ
- 1.4.2 แนวทางในการผลิตโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของวัสดุผสม (Composite Materials)
- 1.5.2 จัดหาเส้นใยจากก้านมะพร้าว
- 1.5.3 ทำการขึ้นรูปโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมะพร้าว
- 1.5.4 ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงดึงของโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมะพร้าว
- 1.5.5 สรุปวิเคราะห์และจัดทำรายงาน

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.7.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 1,140 บาท

รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวน	ราคา (บาท)
โพลีเอสเตอร์เรซิน	120	5 กิโลกรัม	600
น้ำยาโคบอลท์	70	3 ขวด	210
ตัวเร่งปฏิกิริยา	70	3 ขวด	210
น้ำยาลอกแบบ PVA	120	1 ขวด	120

1.7.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป 1,275 บาท

รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวน	ราคา (บาท)
แผ่นอะคลิลิกขนาด 2 mm	135	1 แผ่น	135
แผ่นอะคลิลิกขนาด 1 mm	65	6 แผ่น	390
แผ่นไมลา	110	2 แผ่น	220
แก้วผสม	25	3 แท็ค	75
เทปกาวสองหน้า	25	5 ม้วน	125
หลอดฉีดยา	8	10 หลอด	80
แผ่นรองตัด	200	1 แผ่น	200
ไม้ตะเกียบแบบหนา	50	1 แท็ค	50

1.7.3 จัดทำรายงาน 1,000 บาท

รวมทั้งสิ้นเป็นเงิน 3,415 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 วรรณกรรมปริทัศน์

จากงานวิจัยของ ศรุต ศรีสันติสุข และคณะ[2] ในหัวข้อการเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ส่วนของเส้นใยไผ่ชนิดสั้นที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ชนิดสั้น เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ชนิดสั้น กับเส้นใยยาวของใยไผ่ ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์ โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ประเภทตามความยาวของเส้นใย คือ

เสริมแรงเส้นใยชนิดสั้น ทำการศึกษาโดยสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ชนิดสั้น ซึ่งมีการสุ่มทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยไผ่แบบไม่ต่อเนื่อง

เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยชนิดยาว ด้วยอัตราส่วนต่อน้ำหนักของเส้นใยไผ่ ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่อง

จากผลการทดลองพบว่า ถึงแม้ปริมาณเส้นใยไผ่ชนิดสั้นจะเพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีความยาวน้อยกว่าความยาวเส้นใยวิกฤต แต่เส้นใยไผ่ชนิดสั้นจะช่วยเพิ่มมอดูลัสแรงดึงตามกฎการผสม โดยมอดูลัสแรงดึงมีค่าสูงกว่าโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง 5.58% และ 13.79% ตามลำดับ เส้นใยไผ่ชนิดยาว ความสามารถในการรับแรงดึงของเส้นใยไผ่ชนิดยาวมีค่ามากกว่าโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง แต่น้อยกว่าเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและคาร์บอนไฟเบอร์ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักเส้นใยเป็น 2 เท่า พบว่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น 35.77%, 42.11% และ 33.7% ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบพบว่า วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยคาร์บอนไฟเบอร์มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด รองลงมาคือใยแก้ว เส้นใยไผ่ชนิดยาว และเส้นใยไผ่ชนิดสั้น โดยเส้นใยไผ่ชนิดยาวจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับใยแก้ว แม้จะมีความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าแต่มีมอดูลัสแรงดึงมากกว่า ในขณะที่เส้นใยไผ่ชนิดสั้นไม่ช่วยเสริมความต้านทานแรงดึง และเพิ่มมอดูลัสแรงดึงให้วัสดุคอมโพสิตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้แทนวัสดุสังเคราะห์ยังพบในงานวิจัยของ จรรยาวรรณ จรรยาธรรม และ ประทับใจ สิกขา[3] ในหัวข้อ การพัฒนาเส้นใยของต้นจากเพื่อใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ (The development of nipa palm fiber for use in product design) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของต้นจาก และการใช้ประโยชน์จากต้นจากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตงานหัตถกรรมเส้นใยจากเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

การวิจัยทำการศึกษารวบรวมข้อมูลด้านคุณลักษณะทางพฤกษศาสตร์ คุณลักษณะทางกายภาพ ภูมิปัญญาท้องถิ่นและการนำต้นจากไปใช้ประโยชน์ รวมทั้งศึกษาวัสดุเส้นใยพืชอื่นๆ ในท้องถิ่นที่อาจนำมาผสมกับเส้นใยจาก โดยศึกษาจากเอกสาร รายงานการวิจัย สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องทางระบบออนไลน์ และจากการลงพื้นที่สำรวจเก็บรวบรวมข้อมูล ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อศึกษากระบวนการดึงเส้นใยและพัฒนาคุณภาพเส้นใยจาก โดยการนำเส้นใยจากผสมกับเส้นใยพืชชนิดอื่น ศึกษาและทดลองผลิตงานหัตถกรรมรูปแบบต่าง ๆ จากเส้นใยพืช เช่น ถักพื้นตีเกลียว การถักเปีย การถัก ทอ สานเส้นใยพืช สำหรับการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ทดสอบคุณสมบัติวัสดุเส้นใยและประเมินความเหมาะสมในการนำมาทำผลิตภัณฑ์ โดยการนำเส้นใยที่แปรรูปจากเส้นใยจากไปทดสอบด้านความเหนียวด้วยการทดสอบแรงดึง สรุปผลการศึกษาด้านวัสดุและรูปแบบผลิตภัณฑ์ และพัฒนาดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์และจัดทำผลิตภัณฑ์ต้นแบบ นำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปประเมินความเหมาะสม

ผลการวิจัยแสดงว่า เส้นใยที่ดึงแยกมาจากโคนก้านใบต้นจากมีคุณสมบัติเป็นเส้นยาวประมาณ 90-110 เซนติเมตร มีความแข็ง และเหนียว มีลักษณะกลมขนาดเล็ก ไม่เหมาะในการนำเส้นใยเส้นเดียวไปใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ควรมีการพัฒนาคุณภาพเส้นใยโดยการนำเส้นใยพืชอื่นๆ เช่น เส้นใยป่านศรนารายณ์ ผักตบชวา กก และเส้นใยกล้วยมาผสมกับเส้นใยจาก ถักพื้นตีเกลียวเป็นเส้นเชือก เพื่อให้เส้นใยผสมที่มีความเหนียวมากขึ้นเหมาะที่จะนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรับน้ำหนักมาก หรือให้เส้นใยผสมมีความอ่อนนุ่ม หรือมีสีสวยงาม

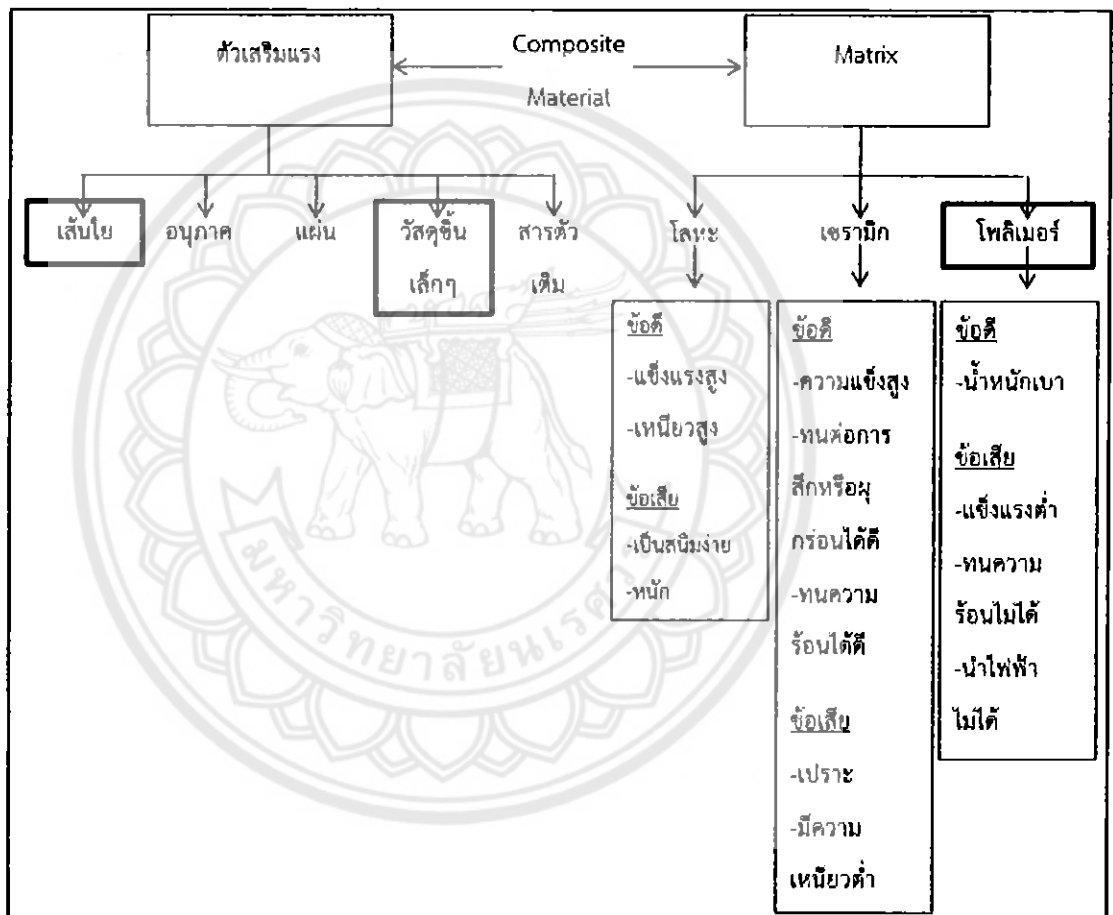
เพื่อให้วัสดุเส้นใยมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ทดลองผสมเส้นใยจากกับเส้นใยพืชอื่น ๆ 4 ชนิด ได้แก่ เส้นใยจากกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ ผักตบชวา กก และเส้นใยกล้วย ในอัตราส่วนเส้นใยจากกับเส้นใยพืชอื่น 50 : 50 และ 75 : 25 แล้วนำไปแปรรูปถักพื้นตีเกลียวเป็นเส้นเชือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.30-2.50 mm แล้วนำไปทดสอบหาค่าการรับแรงดึงสูงสุดเพื่อทดสอบค่าความเหนียวของเส้นใย

ผลการทดสอบคุณภาพความเหนียวของเส้นใยผสมเส้นใยจากกับเส้นใยพืชอื่นๆ สรุปได้ว่าเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยโคนก้านใบต้นจากกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ อัตราส่วน 50:50 มีความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุด รองลงมาได้แก่ เส้นใยโคนก้านใบต้นจากผสมเส้นใยกล้วย อัตราส่วน 75:25 และเส้นใยโคนก้านใบต้นจากผสมเส้นใยกก อัตราส่วน 75:25

สรุป

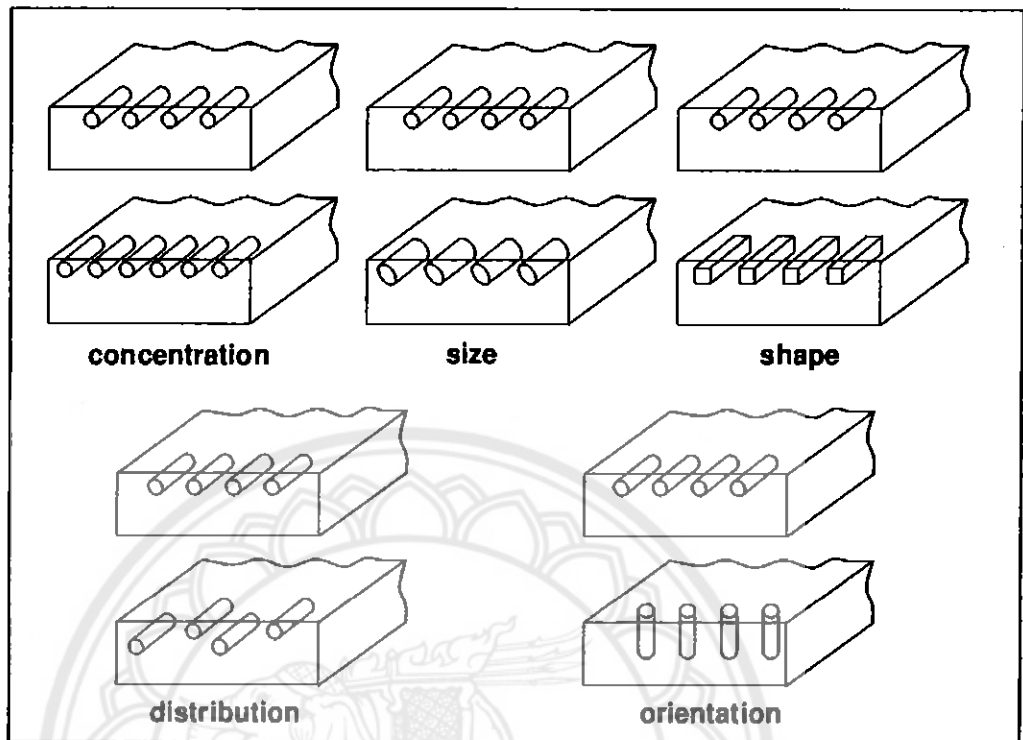
1. เส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงดึง
2. สามารถนำเส้นใยธรรมชาติมาพัฒนาเป็นวัสดุผสมทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ได้

2.2 วัสดุผสม (Composite Material)



รูปที่ 2.1 วัสดุผสม (Composite Material)

ตัวเสริมแรงในวัสดุผสมนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบดังจะเห็นในรูปที่ 2.1 และการเรียงตัวหรือขนาดส่งผลต่อวัสดุผสมทั้งสิ้น ดังรูปที่ 2.2 ที่จะแสดงลักษณะต่างๆของการกระจายตัวที่จะส่งผลต่อวัสดุผสม



รูปที่ 2.2 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุผสม ได้แก่ ความเข้มข้น ขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัว[4]

2.2.1 การแบ่งวัสดุผสมตามประเภทของเนื้อพื้น

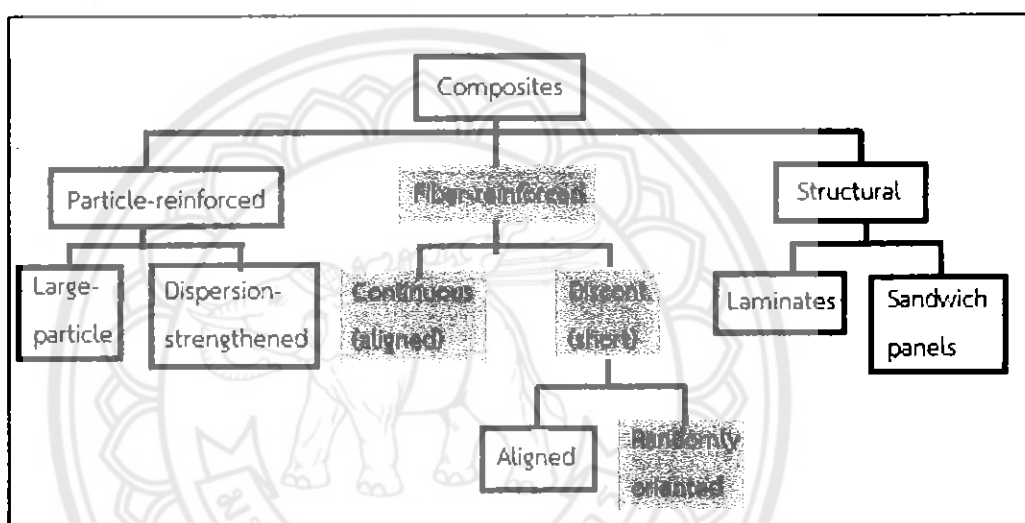
2.2.1.1 กลุ่มที่มีโพลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (fiber-reinforced polymers, FRP) หรือโพลิเมอร์เมทริกซ์(Polymer-Matrix Composites : PMCs): มีโพลิเอสเตอร์เรซินเป็นเมทริกซ์มีคุณสมบัติเด่นที่อุณหภูมิห้องง่ายต่อการผลิตและราคาถูก

2.2.1.2 กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (ceramic-matrix composite,CMC) : มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์มีคุณสมบัติเด่น ด้านความแข็ง ความแข็งแรง และความเหนียว ใช้ในการทำส่วนประกอบเครื่องยนต์ ใบพัดเครื่องยนต์ กังหันในเครื่องบิน

2.2.1.3 กลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (metal-matrix composite, MMC): มีโลหะหรือโลหะเป็นเนื้อพื้น มีคุณสมบัติเด่นในด้านการรับแรง ใช้งานได้ดีในอุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ มีความแข็งแรงมากต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก ส่วนมากใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการสร้างเครื่องยนต์ต้นกำลัง การพัฒนาเครื่องบิน

2.2.2 การแบ่งวัสดุผสมตามลักษณะของตัวเสริมแรง

ประเภทของวัสดุผสมแบ่งได้ตามลักษณะของตัวเสริมแรง สามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composite) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composite) และวัสดุผสมโครงสร้าง (structural composite) นอกจากนี้แล้ววัสดุผสมแต่ละประเภทยังสามารถเป็นประเภทย่อยๆได้ อีก ดังแสดงในแผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพสิตในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังการแบ่งประเภทวัสดุผสม

2.2.2.1 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค คือ วัสดุผสมที่มีอนุภาคของวัสดุ ใดๆ กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งอนุภาคนี้มี รูปร่างได้หลายแบบ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้ เป็น 2 ประเภทคือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (large-particle composite) และคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (dispersion-strengthened composite)

ก. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้ คือมองภาพรวมของอนุภาค ไม่ใช่มองในระดับบะตอมหรือโมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่จนเกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ รูปร่างของอนุภาคอาจเป็นได้ หลายแบบแต่ควรมีลักษณะสมมาตร(equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุกๆทิศทางนอกจากนี้ ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นด้วย

ข. วัสดุผสมที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้ อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าวัสดุผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่มาก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (particle-matrix interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงนี้จะคล้ายกับกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (precipitation hardening)

อีกตัวอย่างหนึ่งคือยางรถยนต์ ซึ่งได้ จากการเติมผงคาร์บอนแบล็ค (carbon black) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร ปริมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรลงไป ในยางวัลคาไนซ์ (vulcanised rubber) เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความแกร่ง และความต้านทานการสึกหรอให้กับยาง

2.2.2.2 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber reinforced polymer) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดูลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

ก. ส่วนประกอบของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

- เส้นใย เช่น วิสเกอร์ (whisker) คือ ผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมากๆ มีสภาพความสมบูรณ์ ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์ จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา เป็นต้น

- ไฟเบอร์ (fiber) คือเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก หรือเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นโพลิเมอร์ หรือเซรามิก ยกตัวอย่างเช่น อะรามิด (aramid) แก้ว คาร์บอน โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

- ลวดเล็ก (fine wire) โดยทั่วไปแล้วลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ และไฟเบอร์และมักจะหมายถึงโลหะ อย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน ยกตัวอย่างการใช้ งานเช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้ เสริมแรงในยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวเคสของจรวด (rocket casing) เป็นต้น

- เมทริกซ์ อาจเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิก หรือโพลีเมอร์ โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี หน้าที่หลักของเมทริกซ์ คือยึดเส้นใยไว้ด้วยกัน และเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังเส้นใย นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของเส้นใย เนื่องจากการขัดถูหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติด (adhesive bonding force) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอ เพื่อป้องกันการที่เส้นใยจะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์

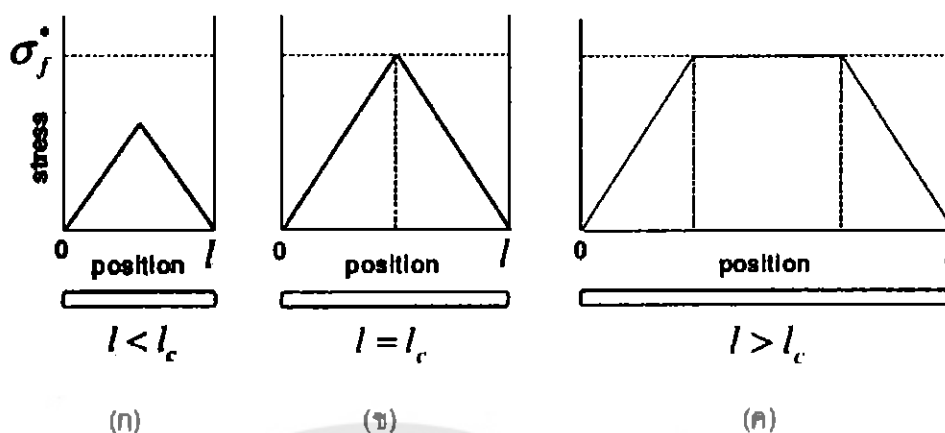
ข. อิทธิพลของความยาวเส้นใยที่มีต่อสมบัติของคอมโพสิต

ความยาวของเส้นใยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงและความแข็งตึงของคอมโพสิต และเพื่อให้คอมโพสิตมีสมบัติดังกล่าวที่ดี เส้นใยที่นำมาเสริมแรงควรมี ค่าความยาววิกฤติ ค่าหนึ่ง ค่าความยาววิกฤตินี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์ กับเส้นใย หรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดคราก (Shear yield strength) ของเมทริกซ์ แล้วแต่ค่าใดน้อยกว่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างความยาววิกฤติของเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย แสดงดังสมการที่ 2.1

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

เมื่อ l_c คือความยาววิกฤติ
 σ_f^* คือความแข็งแรงสูงสุด หรือความต้านทานแรงดึงของเส้นใย
 d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย
 τ_c คือความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์ กับเส้นใย หรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดครากของเมทริกซ์ แล้วแต่ค่าใดน้อยกว่ากัน

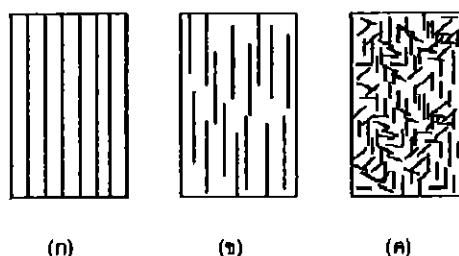
โดยทั่วไปแล้ว สำหรับคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับคาร์บอนเมทริกซ์ เส้นใยจะมีค่าความยาววิกฤติ ประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น 20-150 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_f^* และความยาวของเส้นใย (l) เมื่อ (ก) $l < l_c$ (ข) $l = l_c$ (ค) $l > l_c$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_f^* และความยาวของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อเส้นใยความยาวน้อยกว่า l_c (รูปที่ 2.4 (ก)) เส้นใยจะไม่สามารถรับแรงได้ มากถึงค่า σ_f^* แต่เมื่อเส้นใยมีความยาวเท่ากับ l_c (รูปที่ 2.4 (ข)) บริเวณกึ่งกลางของความยาวเส้นใย จะสามารถรับแรงได้ ถึงค่า σ_f^* และถ้าเส้นใยมีความยาวมากกว่า l_c (รูปที่ 2.4 (ค)) ช่วงของความยาวเส้นใยที่สามารถรับแรงได้ถึงค่า σ_f^* จะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้วยเส้นใยดีขึ้นด้วย

สามารถแบ่งประเภทของเส้นใยตามความยาวได้เป็น 2 ประเภทคือเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) ในกรณีเส้นใยต่อเนื่อง หมายถึงเส้นใยมีความยาวมากกว่า l_c มากๆ (โดยทั่วไปคือมากกว่า $15l_c$) ส่วนเส้นใยไม่ต่อเนื่องหมายถึงเส้นใยมีความยาวน้อยกว่า l_c นอกจากนี้เมื่อนำเส้นใยไปผสมกับเมทริกซ์ ให้ เกิดเป็นคอมโพสิต จะสามารถจัดเรียงตัวได้ สามแบบด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

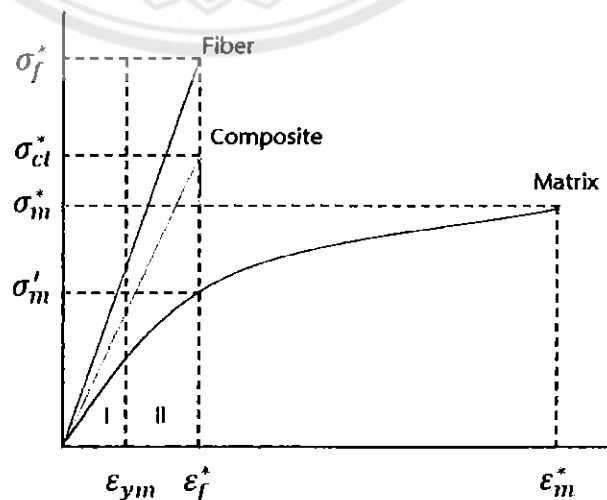


รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ แบบต่างๆ (ก) เส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน (ข) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน และ (ค) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

จากรูปที่ 2.5 (ก) คือคอมโพสิตประเภทเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน นั่นคือเส้นใยมีความยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิตและเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยที่ดี ส่วนรูปที่ 2.5 (ข) คือกรณีที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน นั่นคือเส้นใยไม่ยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิต แต่้วยังจัดเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยไม่ดีเท่าในกรณีแรกสุดท้ายรูปที่ 2.5 (ค) คือเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ กรณีนี้ประสิทธิภาพการเสริมแรงจะต่ำที่สุดจากทั้งสามประเภทที่กล่าวมา ซึ่งวิธีการคำนวณค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยประเภทต่างๆเหล่านี้ จะกล่าวถึงต่อไปในบทนี้

ค. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าคอมโพสิตประเภทเสริมแรงเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) คือคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิตและเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มี ประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยที่ดี ซึ่งสามารถพิจารณาได้ จากค่ามอดูลัสยืดหยุ่น เมื่อคอมโพสิตประเภทนี้ได้รับแรงในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของเส้นใย อย่างไรก็ตามถ้าคอมโพสิตตัวเดียวกันนี้ได้รับแรงในทิศตั้งฉากกับการเรียงตัวของเส้นใยแล้ว ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (หรือประสิทธิภาพในการเสริมแรง) จะลดลงเป็นอย่างมาก ลักษณะที่สมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมากเช่นนี้ ทำให้เราสามารถเรียกคอมโพสิตประเภทนี้ได้ ว่าเป็นวัสดุที่มีสภาพแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) สูง



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เมทริกซ์ และคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อทิศทางการให้ แรงขนานกับเส้นใย

พฤติกรรมความเค้นความเครียดแบบดึง เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย สำหรับคอมโพสิตประเภทเสริมแรงเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อได้ รับแรงใน แนวขนานกับเส้นใยจะมีพฤติกรรมความเค้นความเครียดแบบดึงดังแสดงในรูปที่ 2.6 เริ่มต้น ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นของเมทริกซ์ (อยู่ในช่วงที่ I) เมื่อให้แรงดึง ทั้งเส้นใย และเมทริกซ์จะมีการยืดออก โดยที่ความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเป็น เส้นตรงหลังจากนั้นเมื่อความเครียดมีค่ามากกว่า ϵ_{ym} (เข้าสู่ช่วงที่ II) เมทริกซ์จะมีการ เปลี่ยนแปลงแบบถาวร และเมื่อให้ แรงเพิ่มขึ้นจนความเครียดมีค่าเท่ากับ σ_f^* จะเกิดการ แตกหักของเส้นใยนั้นคือเส้นใยไม่ได้ช่วยในการรับแรงอีกต่อไป ดังนั้นความสามารถในการ ต้านทานแรงดึงสูงสุดของคอมโพสิตจะมีค่าเท่ากับ σ_c^* และหลังจากนั้นจะมีเพียงเมทริกซ์ ที่ ทำหน้าที่รับแรง และคอมโพสิตจะแตกหักเมื่อได้รับแรงดึงที่ทำให้เกิดค่าความเครียดสูงสุด เท่ากับ ϵ_m^* ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เมทริกซ์แตกหัก

พฤติกรรมยืดหยุ่น เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย ในกรณี ที่พันธะระหว่าง เส้นใยกับเมทริกซ์ มีความแข็งแรงมาก ดังนั้นเมื่อได้ รับแรงกระทำ เส้นใยและเมทริกซ์ จะมี การเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆกัน หรือที่เรียกว่าสถานะความเครียดเท่ากัน (isostrain state)

แรงที่คอมโพสิตรองรับ (F_c) จะมีค่าเท่ากับแรงที่เมทริกซ์รองรับ (F_m) รวมกับแรงที่ เส้นใยรองรับ (F_f) ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$F_c = F_m + F_f \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

และจากความสัมพันธ์ ระหว่างแรงกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานและความเค้นที่ว่า

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ 2.2 ใหม่ได้ว่า}$$

$$\begin{aligned} \sigma_c A_c &= \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \\ \sigma_c &= \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \end{aligned} \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

เนื่องจากเส้นใยมีความยาวต่อเนื่องตลอดทั้งชิ้นงาน ดังนั้นคอมโพสิต เมทริกซ์และ เส้นใยต่างก็มีความยาวเท่ากัน นั่นคือ $\frac{A_m}{A_c} = V_m$ และ $\frac{A_f}{A_c} = V_f$ และเมื่อแทนลงในสมการที่

2.3 จะได้ว่า

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

และเนื่องจากอยู่ในสถานะความเครียดเท่ากัน $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$ จะได้ว่า

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

ในกรณีที่คอมโพสิตมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่น จะได้ว่า

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

เมื่อ E_{cl} คือค่ามอดูลัสของคอมโพสิตในแนวขนานกับเส้นใย

นอกจากนี้เรายังสามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงที่เส้นใยรองรับกับแรงที่เมทริกซ์รองรับได้จากสมการ

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (\text{สมการที่ 2.7})$$

ความต้านทานแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใยของคอมโพสิตแบบเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน ในกรณีที่ให้ออกแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใยของคอมโพสิตแบบเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เราสามารถหาค่าความต้านทานแรงดึงในแนวขนานของคอมโพสิตนี้ (σ_{cl}^*) ได้ จากสมการ

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f \quad (\text{สมการที่ 2.8})$$

เมื่อ σ_m' คือค่าความเค้นในเมทริกซ์ เมื่อเส้นใยหัก และ σ_f^* คือความต้านทานแรงดึงของเส้นใย

ความต้านทานแรงดึงในแนวตั้งฉากกับเส้นใย ค่าความต้านทานแรงดึงในแนวตั้งฉากกับเส้นใยมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น สมบัติของเส้นใยและเมทริกซ์ ช่องว่างหรือรูพรุนในชิ้นงาน และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์เราสามารถแก้ไขได้ โดยปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์ ค่าความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย ทั้งในแนวขนานและตั้งฉากกับเส้นใยแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยบางชนิด

วัสดุ	ความต้านทานแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใย (MPa)	ความต้านทานแรงดึงในแนวตั้งฉากกับเส้นใย (MPa)
Glass-polyester	700	20
Carbon-epoxy	1000	35
Kevlar-epoxy	1200	20

* ปริมาณของไฟเบอร์อยู่ที่ประมาณ 50 โดยปริมาตร (จาก Callister, 2003 หน้า 542)

ง. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน

เส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องที่ใช้ ในคอมโพสิตประเภทนี้เป็นได้ ทั้งเส้นใยแก้ว คาร์บอน และอะรามิต โดยที่คอมโพสิตประเภทนี้ สามารถมีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นและความต้านทานแรงดึงได้ สูงถึง 90% และ 50% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่อง ความแข็งแรงในทิศทางขนานกับเส้นใยสามารถพิจารณาได้ สองกรณี คือ กรณี ที่เส้นใยมีความยาว (l) มากกว่าค่า l_c และเส้นใยมีความยาวน้อยกว่าค่า l_c ในกรณีที่เส้นใยมีความยาวมากกว่าค่า l_c จะได้ว่า

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma'_m (1 - V_f) \quad (\text{สมการที่ 2.9})$$

ในกรณีที่เส้นใยมีความยาวน้อยกว่าค่า l_c จะได้ว่า

$$\sigma_{cd}^* = \frac{l \tau_c}{d} V_f + \sigma'_m (1 - V_f) \quad (\text{สมการที่ 2.10})$$

เมื่อ l คือความยาวของเส้นใย

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

τ_c คือค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ (fibre-matrix bond strength) หรือค่าความแข็งแรงเฉือนยังผลของเมทริกซ์ (matrix shear yield strength) แล้วแต่ค่าใดน้อยกว่ากัน

จ. คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นระเบียบ

ในกรณีที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในเมทริกซ์ คอมโพสิตนั้นจะมีค่ามอดูลัส (E_{cd}) เท่ากับ

$$E_{cd} = KE_f V_f + E_m V_m \quad (\text{สมการที่ 2.11})$$

เมื่อ K คือ ประสิทธิภาพของการเสริมแรง (ขึ้นอยู่กับค่า V_f และ $\frac{E_f}{E_m}$ ratio)

โดยทั่วไปจะค่า K อยู่ในช่วง 0.1 - 0.6 [3]

ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมื่อมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยและทิศทางของความเค้นต่างกัน จากตารางจะเห็นได้ ว่าในกรณีที่เส้นใยทุกเส้นขนานกัน ประสิทธิภาพของการเสริมแรงจะสูงสุด (เท่ากับ 1) เมื่อให้ความเค้นในทิศทางขนานกับเส้นใย และจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด (เท่ากับ 0) เมื่อให้ความเค้นในทิศตั้งฉากกับเส้นใย สำหรับกรณีที่เส้นใยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระนาบหนึ่งๆ ประสิทธิภาพในการเสริมแรงจะมีค่าเท่ากับ 3/8 เมื่อทิศทางของความเค้นอยู่ในระนาบนั้นๆ กรณี สุดท้ายคือเส้นใยกระจายตัวไม่

เป็นระเบียบแต่สม่ำเสมอในสามมิติ ประสิทธิภาพการเสริมแรงจะมีค่าเท่ากับ 1/5 เมื่อให้ความเค้นในทิศทางใดๆในระบบสามมิติ

ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมื่อมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยและทิศทางของความเค้นต่างกัน

การจัดเรียงตัวของเส้นใย	ทิศทางของความเค้น	ประสิทธิภาพของการเสริมแรง (K)
เส้นใยทุกเส้นขนานกัน	ขนานกับเส้นใย	1
	ตั้งฉากกับเส้นใย	0
เส้นใยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระนาบเฉพาะหนึ่งๆ	ทุกทิศทางในระนาบนั้นๆ	3/8
เส้นใยกระจายตัวไม่เป็นระเบียบแต่สม่ำเสมอในสามมิติ	ทุกทิศทาง	1/5

(แปลจาก Callister, 2003 หน้า 544)

2.3 โพลีเอสเตอร์เรซิน

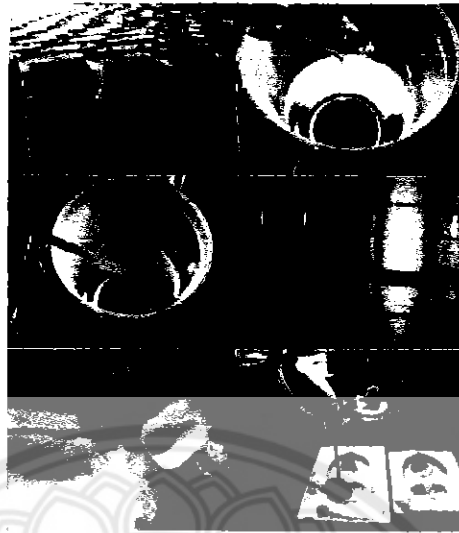
โพลีเอสเตอร์เรซิน คือพลาสติกหล่อชนิดหนึ่ง เกิดจากการรวมตัวแบบ Condensation polymerization ของสารประกอบจำพวกไกลคอล (Glycol) และไดเบสิกอะซิด (Dibasic acid)

2.3.1 ชนิดของโพลีเอสเตอร์เรซิน

2.3.1.1 ชนิดอิ่มตัว (Saturated polyester resin)

2.3.1.2 ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin)

ซึ่งชนิดไม่อิ่มตัวเป็นเรซินที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน โพลีเอสเตอร์เรซินจะอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว และหลังจากเกิดปฏิกิริยาความร้อนจะทำให้แข็งตัวเป็นพลาสติกแข็งที่ไม่สามารถแปรสภาพเป็นพลาสติกเหลวคืนรูปได้อีก ซึ่งจะเรียกว่า Thermosetting plastic



รูปที่ 2.7 โพลีเอสเตอร์เรซิน

2.3.2 คุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์เรซิน

2.3.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ ให้คุณสมบัติที่ แข็ง สนิบ

2.3.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เพราะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ครบถ้วน

2.3.2.3 คุณสมบัติทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี และไม่เป็สนิม

2.3.3 การแข็งตัวของเรซิน

2.3.3.1 โดยการใส่ตัว Hardener หรือตัวทำให้แข็งและความร้อน

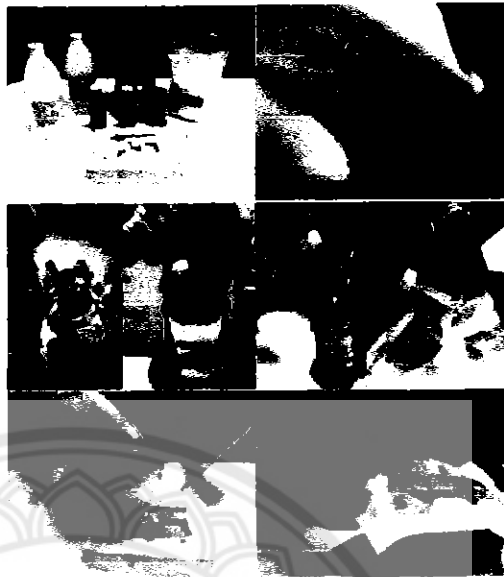
2.3.3.2 โดยการใส่ Hardener หรือตัวทำให้แข็ง และ Accelerator หรือตัวเร่ง

ปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิห้อง

2.3.3.3 โดยการใส่แสงอุลตราไวโอเลต

2.3.3.4 โดยการใช้อิเลคตรอน

2.3.3.5 โดยการให้ความร้อนเช่นการอบ หรือตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานาน ความร้อนที่อยู่ในภาชนะเก็บ ถึงจะเป็นแค่อุณหภูมิอุ่นๆ แต่เมื่อใช้เวลาดังกล่าวพอ โพลีเอสเตอร์เรซินก็จะแข็งตัวได้



รูปที่ 2.8 การแข็งตัวของโพลีเอสเทอร์เรซิน

2.3.4 องค์ประกอบต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของโพลีเอสเทอร์เรซิน

2.3.4.1 อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงจะทำให้โพลีเอสเทอร์เรซินแข็งตัวได้เร็วขึ้น อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้เรซินจะแข็งตัวช้าลง

2.3.4.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา การผสมตัวเร่งที่มากขึ้น การแข็งตัวก็จะเร็วขึ้นแต่การหดตัวจะเพิ่มมากขึ้น หากผสมตัวเร่งเกิน 2% เรซินจะมีเนื้อนิ่มขึ้นเพราะในตัวเร่งมีสารนิ่มเป็นองค์ประกอบอยู่ภายใน และหากผสมตัวเร่งน้อยการแข็งตัวจะช้าลง การหดตัวน้อยลง




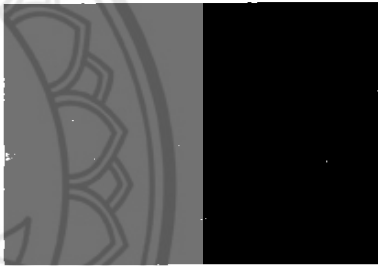


2.4 เส้นใยธรรมชาติจากมะพร้าว



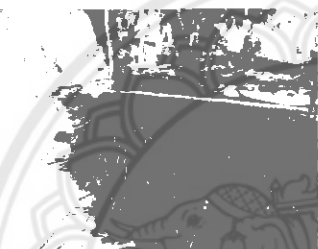


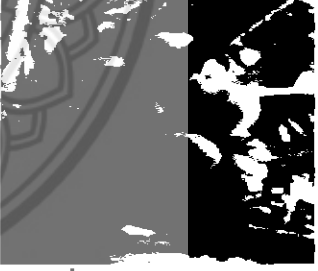
มะพร้าวเป็นพืชยืนต้น ที่อยู่ในตระกูลปาล์ม เป็นพืชที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น น้ำและเนื้อมะพร้าวอ่อนใช้รับประทาน เนื้อมะพร้าวแก่สามารถนำมาคั้นเป็นน้ำกะทิ ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารหลายชนิด กะลานำไปประดิษฐ์เป็นของใช้และของตกแต่งต่างๆได้ เช่น โคมไฟ กระบาย

2.4.1 ประโยชน์ที่ได้จากมะพร้าว[5]

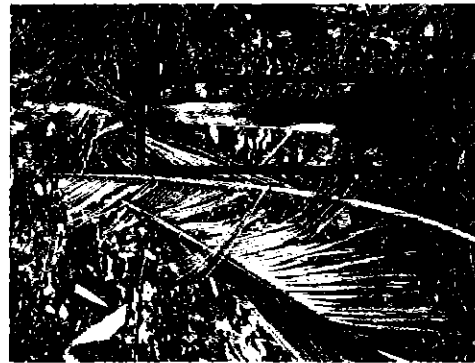
มะพร้าวมีประโยชน์มากมาย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประโยชน์ที่ได้จากมะพร้าว

 <p>น้ำมะพร้าว เป็นส่วนประกอบในอาหารหลายชนิดทั้งคาวและหวาน เช่น วุ้นมะพร้าว ฯลฯ</p>	 <p>เนื้อมะพร้าวอ่อน สามารถกินเป็นของทานเล่น หรือจะใช้ผสมเป็นวัตถุดิบในอาหารทั้งคาวและหวานได้</p>
 <p>เนื้อมะพร้าวแก่ นำมาคั้นเป็นกะทิ ใช้เป็นวัตถุดิบของอาหารคาวและหวาน กากที่เหลือสามารถนำมาทำเป็นอาหารสัตว์ได้</p>	 <p>ยอดอ่อนของมะพร้าว สามารถนำมาทำอาหารได้ เนื่องจากการเก็บเกี่ยวยอดมะพร้าวจะทำให้มะพร้าวต้นนั้นตาย ยอดมะพร้าวจึงมีราคาแพง</p>
 <p>น้ำมันมะพร้าว ได้จากการบีบหรือต้มกากมะพร้าวขูด นำไปในการปรุงอาหารหรือใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางได้</p>	 <p>กะลามะพร้าว สามารถนำมาใช้งานประดิษฐ์ต่างๆได้ เช่น กระบาย โคมไฟ กระดุม ซอฮู้</p>

 <p>ก้านใบหรือทางมะพร้าว ใช้ทำเป็นของใช้ได้</p>	 <p>ช่อดอกมะพร้าว เป็นส่วนที่ให้น้ำตาล เรียก น้ำตาลมะพร้าว</p>
 <p>เปลือกหุ้มรากมะพร้าว ใช้เป็นยารักษาโรคคอ ตีบ</p>	 <p>ใยมะพร้าว นำไปใช้ยัดฟูก ทำเสื่อ หรือสามารถ นำไปใช้ในการเกษตรได้</p>
 <p>ลำต้น สามารถนำมาตัดแปลงทำเป็น เฟอร์นิเจอร์ได้</p>	 <p>ก้านมะพร้าว ซึ่งเป็นส่วนของแกนกลางของใบ มะพร้าว</p>

มะพร้าวเป็นพืชที่สามารถหารับประทานได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งตามสถิติประเทศไทยมีเนื้อที่ให้ผล ปี 2554 เท่ากับ 1,330 พันไร่ ในปี 2555 ผลผลิตเท่ากับ 1,055 พันตัน และผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 782 กิโลกรัม และในปี 2555 พบว่าในจังหวัดพิษณุโลกมีเนื้อที่ยืนต้นของมะพร้าวเท่ากับ 1,781 ไร่ เนื้อที่ให้ผลเท่ากับ 1,781 ไร่ ผลผลิตเท่ากับ 1,923 ตัน และผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 1,080 กิโลกรัม ข้อมูลจากสถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555 จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร[6]



ก้านใบของมะพร้าว

รูปที่ 2.9 ก้านใบของมะพร้าว

ส่วนที่จะนำมาทำเส้นใย คือ ก้านใบของมะพร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เมื่อคิดว่าต้นมะพร้าว 1 ต้น มีปริมาณก้านมะพร้าวทั้ง 100 ก้านต่อไร่ จะคิดเป็น 178,100 ก้านต่อปี

ตารางที่ 27 มะพร้าว : เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ 10 อันดับแรกปี 2552-2554

Table 27 Coconuts: Harvested area, production and yield of major countries, 2009-2011

ประเทศ	เนื้อที่ให้ผล (1,000 ไร่)			ผลผลิต (1,000 ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)			Country
	2552 2009	2553 2010	2554 2011	2552 2009	2553 2010	2554 2011	2552 2009	2553 2010	2554 2011	
รวมทั้งโลก	71,806	71,107	71,485	61,375	59,882	59,190	855	842	828	World Total
อินโดนีเซีย	18,125	18,625	18,625	19,000	18,000	17,500	1,048	966	940	Indonesia
ฟิลิปปินส์	21,259	22,350	22,262	15,668	15,510	15,245	737	694	685	Philippines
อินเดีย	11,845	11,849	12,250	10,824	10,840	11,200	914	915	914	India
บราซิล	1,775	1,719	1,691	2,960	2,843	2,944	1,668	1,654	1,741	Brazil
ศรีลังกา	2,468	2,468	2,468	2,168	1,762	1,523	878	714	617	Sri Lanka
ปาปัวนิวกินี	1,350	1,375	1,375	1,196	1,196	1,238	886	870	900	Papua New Guinea
เวียดนาม	759	877	900	1,129	1,162	1,189	1,487	1,325	1,321	Viet Nam
ไทย	1,487	1,443	1,350	1,381	1,247	1,055	929	864	782	Thailand

ที่มา : องค์การอาหารและเกษตรกรรมแห่งสหประชาชาติ
ปรับปรุงโดย สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร
หมายเหตุ : ข้อมูล ณ มกราคม 2556

Source : Food and Agriculture Organization of the United Nations
Update by Office of Agricultural Economics
Remark : Data at January, 2013

รูปที่ 2.10 มะพร้าว : เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ
10 อันดับแรกปี 2552-2554

ตารางที่ 29 ผลผลิต : เนื้อที่ ผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาค และรายจังหวัด ปี 2553-2555
Table 29 Coconuts: Area, production and yield by region and province, 2010-2012

ภาค/จังหวัด	เนื้อที่ปลูกรวม (ไร่) Planted area (ไร่)			เนื้อที่เกี่ยว (ไร่) Harvested area (ไร่)			ผลผลิต (ตัน) Production (Tons)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.) Yield per ไร่ (kg)			Region/Province
	2553 2010	2554 2011	2555 2012	2553 2010	2554 2011	2555 2012	2553 2010	2554 2011	2555 2012	2553 2010	2554 2011	2555 2012	
รวมทั้งประเทศ	1,449,807	1,355,592	1,307,364	1,443,439	1,348,959	1,332,484	1,246,540	1,055,318	1,056,556	864	782	793	Whole Kingdom
เหนือ	18,551	15,532	12,187	18,551	15,532	12,167	19,535	15,261	11,791	1,053	943	956	Northern
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	25,796	19,494	8,767	25,776	19,474	8,747	23,279	6,585	6,843	903	820	794	North-eastern
กลาง	550,181	612,661	594,256	644,540	695,755	599,482	597,864	467,282	491,055	928	803	637	Central
ใต้	755,179	717,925	712,155	754,072	717,196	712,056	605,542	554,190	553,864	803	759	778	Southern
ตาก	5,871	4,967	4,490	5,871	4,967	4,490	5,364	5,032	4,436	1,064	1,009	964	Tak
พิษณุโลก	2,707	2,059	1,781	2,707	2,059	1,781	3,162	2,279	1,923	1,166	1,107	1,080	Phitsanulok
พิจิตร	323	284	234	323	264	234	462	371	295	1,430	1,306	1,261	Phichit
หนองบัวลำภู	4010	3,463	2,263	4,010	3,463	2,263	3,846	3,176	2,625	959	917	595	Nakhon Sawan
เพชรบูรณ์	5,740	4,739	3,419	5,740	4,739	3,419	5,601	4,493	3,111	1,011	929	910	Phetchabun

รูปที่ 2.11 เนื้อที่ ผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาค และรายจังหวัด ปี 2553-2555

2.5 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

สมบัติเชิงกล[7] (Mechanical Properties) คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่จะแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ ได้แก่

2.5.1 ความเค้น (Stress) เป็นลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของวัสดุ ที่มีความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอก ที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ โดยแบ่งชนิดของความเค้นได้เป็นดังนี้

2.5.1.1 Tensile Stress หมายถึง ความเค้นแรงดึงที่เกิดจาก Tensile Force ที่มากระทำต่อชิ้นงาน

2.5.1.2 Compressive Stress หมายถึงความเค้นแรงกด หรือ ความเค้นแรงอัด

2.5.1.3 Shear Stress หมายถึงความเค้นแรงเฉือน เป็นความเค้นที่เกิดจาก Shear Force

2.5.1.4 Bending Stress หมายถึงความเค้นแรงดัด เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นต่อเมื่อชิ้นงานนั้นๆได้รับแรงดัด

2.5.1.5 Torsion Stress หมายถึงความเค้นแรงบิด เป็นความเค้นที่เกิดจาก Torque กระทำต่อชิ้นงานนั้นๆ

2.5.2 ความเครียด (Stain) เป็นความเครียดที่ปรากฏภายใต้แรงที่มากระทำต่อเนื้อของวัสดุจนวัสดุเกิดรับแรงนั้นไม่ไหว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มา

กระทำ เช่น เกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction) โดยแบ่งชนิดของความเครียดได้เป็นดังนี้

2.5.2.1 Tensile Stain หมายถึง ความเครียดแรงดึงที่เกิดจาก Tensile Force ที่มากระทำต่อชิ้นงาน

2.5.2.2 Compressive Stain หมายถึงความเครียดแรงกด หรือ ความเครียดแรงอัด

2.5.2.3 Shear Stain หมายถึงความเครียดแรงเฉือน เป็นความเครียดที่เกิดจาก Shear Force

2.5.3 ความแข็งแรง (Strength) หมายถึงความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงกดหรือแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ซึ่งเราสามารถจะสังเกตได้จาก Stress-Stain Curve ซึ่งตรงจุดแตกหัก(Breaking Point) นั้นเราจะเรียกกันว่า เป็นจุดความแข็งแรงที่จุดแตกหักนั่นเอง

2.5.4 ความแข็งแกร่ง (Stiffness) หมายถึงสมบัติของวัสดุที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือต่อการเปลี่ยนรูปในช่วง Elastic limit ในขณะที่กำลังรับแรงนั้นๆอยู่ ค่าความแกร่งจะเปลี่ยนแปลงไป ตามค่าของ Modulus of Elastic และค่า Rigidity

2.6 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

[8]การทดสอบแรงดึงจะใช้ขึ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน แต่ขณะเดียวกันสามารถใช้ขึ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกนข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไป ได้แก่ ร้อยละการยืด (percent elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) เป็นต้น

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงขึ้นทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกลอยใต้สภาวะการยืด และเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำการตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้น นั่นคือการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยความยาวระยะทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงปกติเท่ากับ 2 นิ้ว

2.6.1 แรงเค้นและความเครียด

แรงเค้น(stress) ในการทดสอบแรงดึง แรงดึงจะแทนด้วยสัญลักษณ์ F ในหน่วยของปอนด์, กิโลกรัม หรือนิวตัน ความแข็งแรงดึงคิดเป็นน้ำหนักที่ขึ้นทดสอบสามารถทนได้ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด น้ำหนักเทียบกับพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางหน่วยเรียกว่า แรงเค้น (stress, σ) โดยแรงเค้นในหน่วยเมทริกซ์ น้ำหนักจะบันทึกเป็นกิโลกรัมแล้วแปลงเป็นนิวตัน ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะคิดเป็นตารางเมตรซึ่งจะไดหน่วยของแรงเค้นเป็นนิวตันต่อตารางเมตรหรือปาสคาล (Pa) เมื่อพิจารณาแท่งทรงกระบอกที่มีความยาวเป็น l_0 และมีพื้นที่หน้าตัดเป็น A_0 ได้รับความดึงในทางเดียว F จะไดแรงเค้น σ ที่กระทำดังสมการที่ 2.12

$$\text{แรงเค้น } \sigma = \frac{F}{A_0}$$

(สมการที่ 2.12)

F (แรงการดึงในทางเดียวเฉลี่ย)
 A_0 (พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น)



รูปที่ 2.12 แสดงระยะยืดของแท่งโลหะทรงกระบอกที่รับแรงดึงทางเดียว F
 (a) แท่งวัสดุที่ไม่ได้รับแรง (b) แท่งวัสดุรับแรงดึงทางเดียว F

ถ้าขึ้นทดสอบแรงดึงมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมสูตรคำนวณแรงเค้นจะได้เป็นสมการที่ 2.13

$$\sigma = \frac{F}{WD} \quad (\text{สมการที่ 2.13})$$

เมื่อ σ = แรงเค้น

F = แรงกระทำ

W = ความกว้างของหน้าตัดสี่เหลี่ยมของชิ้นทดสอบ

D = ความยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมของชิ้นทดสอบ

ความเครียด(strain) เมื่อแท่งวัสดุได้รับแรงดึงในทางเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นเหตุให้แท่งวัสดุเกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้น การเคลื่อนนี้เรียกว่าความเครียด (strain) โดยนิยามความเครียดเป็นการยืดอันเนื่องมาจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นทดสอบซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ดังนั้นก่อนทำการทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ โดยระยะทดสอบเริ่มต้นจำเป็นต้องทำเครื่องหมายสองจุดบนชิ้นทดสอบ อุปกรณ์วัดการยืดหรือความเครียดจะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้นทดสอบในระหว่างการทดสอบ หรืออาจวัดจากผลต่างของระยะห่างของสองจุดข้างต้น ผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืด(elongation) หน่วยของระยะยืดใช้เป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร และถ้านำค่าระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่าความเครียด ดังนั้นความเครียดของแท่งวัสดุดังแสดงในรูปที่ 2.12 สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.15

$$\text{ความเครียด } \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l (\text{ผลต่างความยาวของชิ้นทดสอบ})}{l_0 (\text{ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ})} \quad (\text{สมการที่ 2.15})$$

เมื่อ l_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

l คือ ความยาวชิ้นทดสอบหลังการดึง

หน่วยของความเครียดในระบบ SI เมตรต่อเมตร(m/m) ดังนั้นความเครียดจึงเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ในทางอุตสาหกรรมจะเปลี่ยนหน่วยไปอยู่ในรูปของร้อยละความเครียด (percent strain) หรือร้อยละการยืด (percent elongation)

$$\text{strain} \times 100\% = \% \text{ elongation} \quad (\text{สมการที่ 2.16})$$

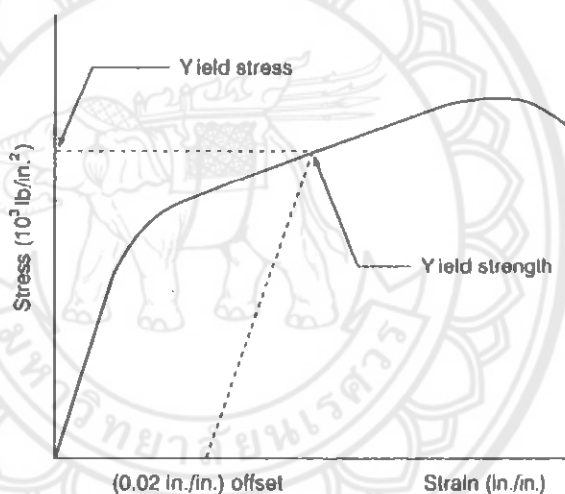
แรงเค้นและความเครียดเนื่องการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุและวัสดุผสมเป็นการเสียรูปภายใต้แรงเค้นดึงทางเดียว นอกจากนั้นยังมีวิธีการอื่นที่สำคัญในการทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้แก่การกระทำภายใต้แรงเค้นเฉือน(shear stress) ซึ่งเป็นการกระทำของคู่แรงเค้นเฉือนปกติต่อรูปทรงลูกบาศก์ดังแสดงในรูปที่ 2.12 คือแรงเฉือน S จะกระทำเหนือพื้นที่ผิว A โดยแรงเค้นเฉือน τ มีความสัมพันธ์กับแรงเฉือน S ดังสมการ

$$\text{แรงเค้นเฉือน} \quad \tau = \frac{S}{A} \quad (\text{สมการที่ 2.17})$$

เมื่อ S = แรงเฉือน

$A =$ พื้นที่ด้านบนที่ถูกแรงเฉือนกระทำ

กราฟแรงเค้นความเครียด (stress strain curve) แรงเค้นเป็นความเข้มของแรงที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ภายในวัสดุในระหว่างการทดสอบ ค่าแรงเค้นคำนวณได้จากแรงกระทำหรือน้ำหนักดึงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น วัสดุที่กลับคืนรูปทรงเดิมโดยปราศจากการเสียรูปถาวรหลังจากที่นำแรงเค้นออกเรียกว่าวัสดุยืดหยุ่น และวัสดุเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุจะใช้กฎของฮุก (Hook's law) ในการอธิบายพฤติกรรมและความเครียดที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะเป็นสัดส่วนกับแรงเค้นที่กระทำ ในกราฟแรงเค้นความเครียดช่วงยืดหยุ่นคือช่วงเริ่มแรกของกราฟจนถึงช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่น ช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่นคือตำแหน่งซึ่งแรงเค้นเพิ่มขึ้นและเริ่มเข้าสู่ช่วงของการเสียรูปถาวร ดังแสดงในรูปที่ 2.13

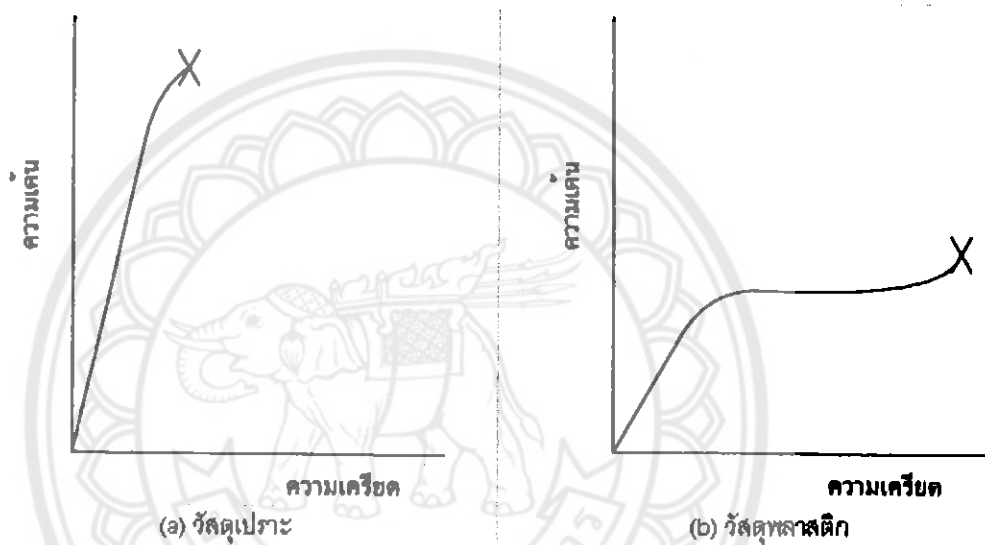


รูปที่ 2.13 กราฟแรงเค้นความเครียด

หลังจากนั้นวัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกได้มาก ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ

ที่จุดสุดท้ายของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุดความเค้นแรงดึงไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่าง

ทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมาแล้ว จะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 2.14 (a) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.14 (b)

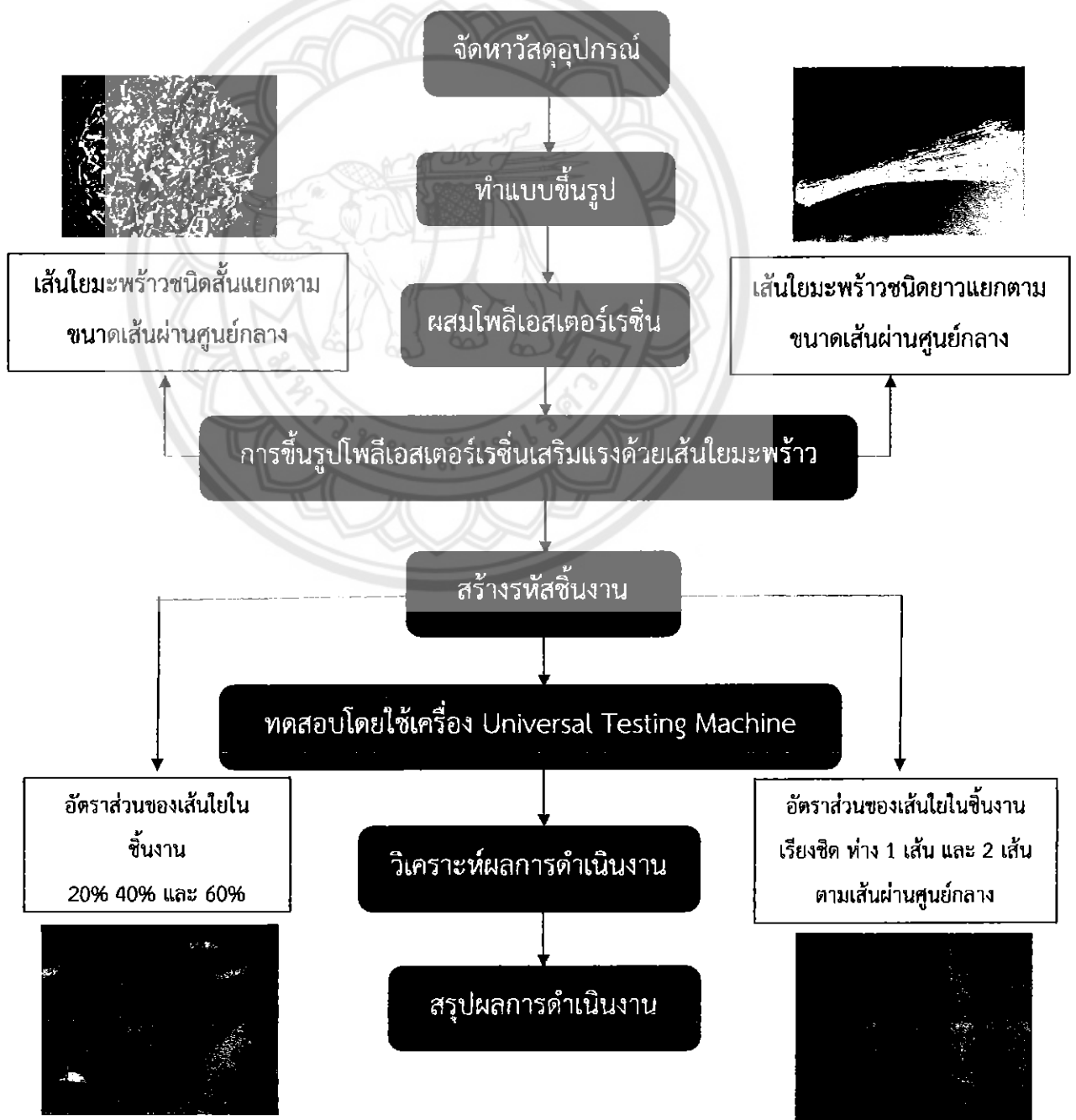


รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



3.2 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป

3.2.1.1 แผ่นอะคลิลิก

3.2.1.2 แผ่นไมลา

3.2.1.3 ไม้บรรทัด

3.2.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัด (กรรไกร, คัตเตอร์)

3.2.1.5 มีดแกะสลัก

3.2.1.6 ถ้วยผสม

3.2.1.7 ไม้ตะเกียบ

3.2.1.8 เทปกาวสองหน้าชนิดหนาและชนิดบาง

3.2.1.9 เทปใส

3.2.1.10 หลอดฉีดยา

3.2.1.11 ถูมือยาง

3.2.1.12 เส้นใยมะพร้าว

3.2.2 สารเคมีที่ใช้

3.2.2.1 โพลีเอสเตอร์เรซิน

3.2.2.2 น้ำยาลอกแบบ (PVA)

3.2.2.3 ตัวเร่งแข็งเรซิน

3.2.2.4 น้ำยาโคบอลท์

3.3 การทำแบบขึ้นรูป (Mold)

3.3.1 ตัดแผ่นอะคลิลิกขนาดหนา 2 mm ให้เป็นขนาด 9.5 cm x 30 cm สำหรับแบบขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

3.3.2 ตัดแผ่นอะคลิลิกขนาดหนา 1 mm ให้เป็นขนาด 1 cm x 30 cm เพื่อใช้ติดขอบเพื่อขึ้นรูปให้เป็นชิ้นงานที่ต้องการ

3.3.3 ติดแผ่นไมลาบนแบบที่เตรียมไว้ด้วยเทปกาวสองหน้าชนิดบาง

3.3.4 ติดแผ่นอะคลิลิกขนาดหนา 1 mm บนขอบของแผ่นอะคลิลิกขนาดหนา 2 mm

3.3.5 ทาแบบด้วยน้ำยาลอกแบบ PVA แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง จะได้แบบขึ้นรูปที่พร้อมใช้งาน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบขึ้นรูปที่พร้อมใช้งาน

3.4 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว

เส้นใยธรรมชาติที่ศึกษาคือ เส้นใยมะพร้าว ซึ่งเป็นเส้นใยส่วนของก้านใบของมะพร้าว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยวิธีการแยกเส้นใยนั้น สามารถทำได้โดยการตัดก้านใบของมะพร้าวออกเป็นท่อนละ 30 cm ใช้มีดปอกส่วนของเปลือกแข็งของก้านใบออก จะสังเกตเห็นว่ามีเส้นใยและส่วนของขุยมะพร้าวที่ยึดเส้นใยไว้ด้วยกัน จากนั้นผ่านก้านมะพร้าวออกเป็นแผ่นประมาณ 1 cm แล้วแช่น้ำทิ้งไว้ให้ขุยมะพร้าวคุดน้ำจนนิ่ม จะสามารถดึงเส้นใยออกมาได้ จากนั้นคัดขนาดเส้นใยโดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ได้ออกมาเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) ดังตารางที่ 3.1



ก้านใบของมะพร้าว

รูปที่ 3.2 ก้านใบของมะพร้าว

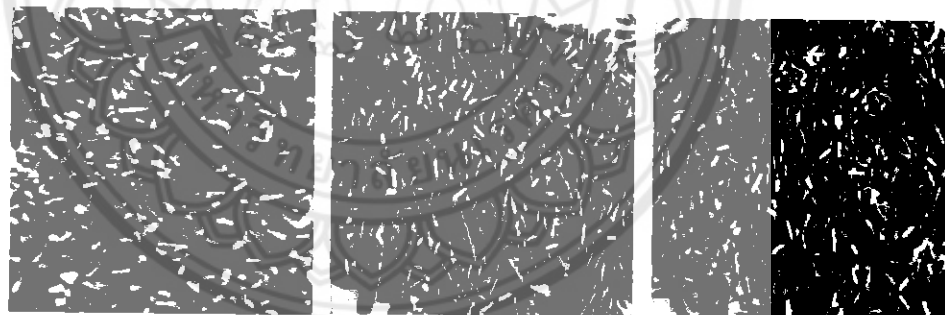
ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมะพร้าว

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง
S	0.49 mm
M	0.59 mm
L	0.76 mm

เมื่อได้เส้นใยมาแล้วแบ่งเส้นใยที่ได้ออกเป็น 2 ส่วนตามขนาดของเส้นใยมะพร้าว ใช้สำหรับเตรียมเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น และเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว

3.4.1 การเตรียมเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น

เมื่อได้เส้นใยมะพร้าวสำหรับเตรียมเส้นใยชนิดสั้นแล้ว ใช้เครื่องตัดกระดาษตัดเส้นใยให้มีความยาวประมาณ 1 mm ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ เส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความยาวเฉลี่ย 1.37 mm แยกไว้ตามขนาดของเส้นใยมะพร้าว ดังรูปที่ 3.3



(a) เส้นใยขนาด S

(b) เส้นใยขนาด M

(c) เส้นใยขนาด L

รูปที่ 3.3 เส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นขนาด S M และ L

3.4.2 การเตรียมเส้นไหมมะพร้าวชนิดยาว

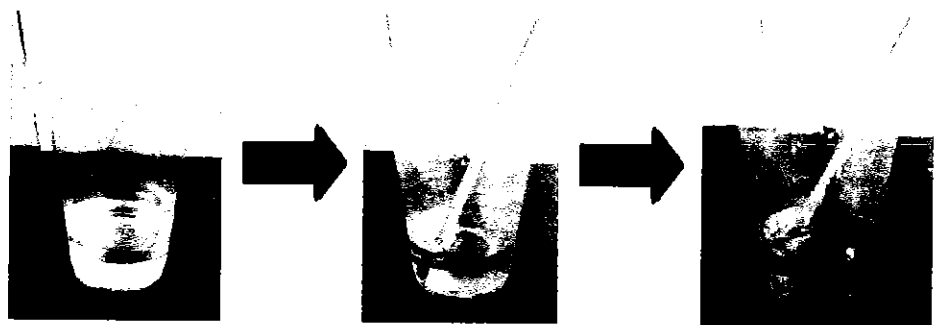
สามารถนำเส้นไหมของส่วนที่เตรียมไว้สำหรับเส้นไหมมะพร้าวชนิดยาวมาใช้ได้เลย โดยแบ่งออกมาเป็น 3 ขนาด คือ คือ ขนาดเล็ก (S), ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เส้นไหมมะพร้าวชนิดยาวขนาด S M และ L

3.5 การผสมโพลีเอสเตอร์เรซิน

ผสมโพลีเอสเตอร์เรซินตามอัตราส่วนดังนี้ โพลีเอสเตอร์เรซิน 40 cc โคบอลท์ 0.3% หรือ 0.12 cc และตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5% หรือ 1 cc ลงในถ้วยผสม โดยตวงโพลีเอสเตอร์เรซินลงในถ้วยผสม แล้วตามด้วยโคบอลท์ คนให้เข้ากันด้วยแท่งไม้ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ เมื่อทั้งสองผสมเข้าด้วยกัน จนกลายเป็นสีชมพูอ่อน ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นตวงตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป คนผสมให้เข้ากัน



รูปที่ 3.5 การผสมโพลีเอสเตอร์เรซิน

3.6 การขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซิน

3.6.1 การขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซินแบบที่ไม่มีการเสริมแรง

เทโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมแล้วลงในแบบขนาด 9.5 cm x 30 cm เกลี่ยโพลีเอสเตอร์เรซินให้ทั่วแบบ แล้วปิดทับด้วยแผ่นไม้อัดอีกแผ่นที่ทาน้ำยาลอกแบบ PVA แล้ว ระวังอย่าให้มีอากาศเข้าไปในชิ้นงาน ตัดออกเป็นขนาด 1.5 cm x 30 cm จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง

3.6.2 การขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ผสมเส้นใยมะพร้าวลงในโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมแล้ว เทลงในแบบขึ้นรูปขนาด 9.5 cm x 30 cm เกลี่ยโพลีเอสเตอร์เรซินให้ทั่วแบบ แล้วปิดทับด้วยแผ่นไม้อัดอีกแผ่นที่ทาน้ำยาลอกแบบ PVA แล้ว ระวังอย่าให้มีฟองอากาศในชิ้นงาน ตัดออกเป็นขนาด 1.5 cm x 30 cm จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.7 โดยที่โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น จะแบ่งออกเป็น 3 อัตราส่วน คือ อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงาน = 20%, 40%, และ 60% หรือ 8 cc, 16 cc, และ 24 cc ตามลำดับตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้หลอดฉีดยาตวงเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น

3.6.3 การขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

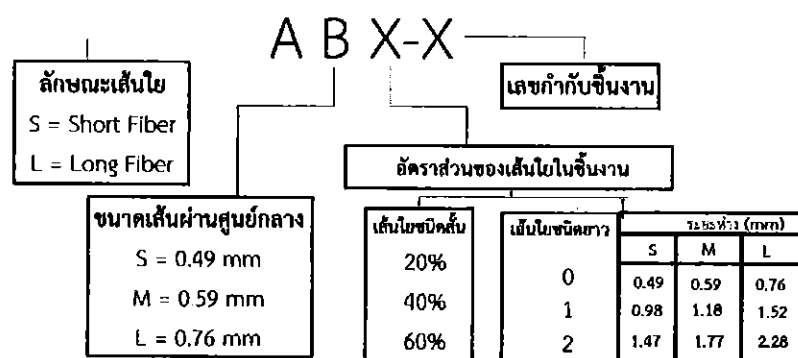
วางเส้นใยมะพร้าวลงในแบบขนาด 9.5 cm x 30 cm ให้ตรง ยึดติดด้วยเทปกาวสองหน้า เทโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมแล้วลงในแบบขึ้นรูป ปิดทับด้วยแผ่นไม้อีกแผ่นที่ทาน้ำยาลอกแบบ PVA แล้ว ระวังอย่าให้มีฟองอากาศในชิ้นงาน ตัดออกเป็นขนาด 1.5 cm x 30 cm จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.8 โดยที่โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว จะแบ่งออกเป็น 3 อัตราส่วน คือ อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงานแบบเรียงเส้นใยชิดกัน, แบบเรียงเส้นใยห่าง 1 เส้น และแบบเรียงเส้นใยห่างกัน 2 เส้น โดยที่ระยะห่างระหว่างเส้นใยจะวางเรียงตามขนาดของเส้นใย



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว

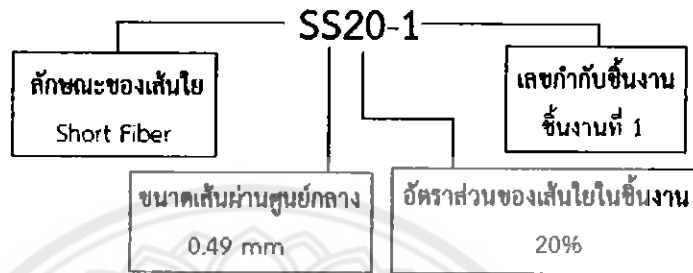
3.7 สร้างรหัสชิ้นงาน

เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนและข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์จากค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงและชิ้นงาน จึงได้ทำการสร้างรหัสชิ้นงานดังรูปที่ 3.9a



รูปที่ 3.9a วิธีการเขียนรหัสชิ้นงาน

เช่น โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49 mm (S) ที่อัตราส่วนของเส้นใยในชิ้นงาน (A) 20% ชั้นที่ 1 (SS20-1) ดังแสดงในรูปที่ 3.9b



รูปที่ 3.9b ตัวอย่างรหัสชิ้นงาน

3.8 การคำนวณหาอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงาน

เมื่อได้ชิ้นงานตามต้องการแล้ว นำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อถ่ายรูปดังรูปที่ 3.10 และใช้รูปในการคำนวณหาอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม ImageJ[9]



(a) โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น (b) โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างรูปภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์

จากนั้นทำการระบายสีเพื่อแยกแหว่งระหว่างเส้นใยมะพร้าวและโพลีเอสเตอร์เรซิน รูปภาพชิ้นงาน จะถูกระบายสีจนทำให้รูปภาพแบ่งออกมาเป็นสีขาวและสีดำ โดยที่สีขาวคือเส้นใยมะพร้าว และสีดำคือโพลีเอสเตอร์เรซินในชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.11



(a) โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น (b) โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างรูปภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ

3.8.1 วิธีใช้โปรแกรม ImageJ

โปรแกรม ImageJ เป็นโปรแกรมประเภท Freeware ที่สามารถใช้โปรแกรมประเภท Search Engine ในการค้นหาได้ [9]

โปรแกรมนี้สามารถนับจุด Pixel ของสีในรูปภาพได้ โดยจะคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ และเมื่อกำหนดให้รูปภาพเป็น B/W โปรแกรมจะนับส่วนที่เป็นสีดำ ซึ่งในที่นี้สีดำคือโพลีเอสเตอร์เรซิน

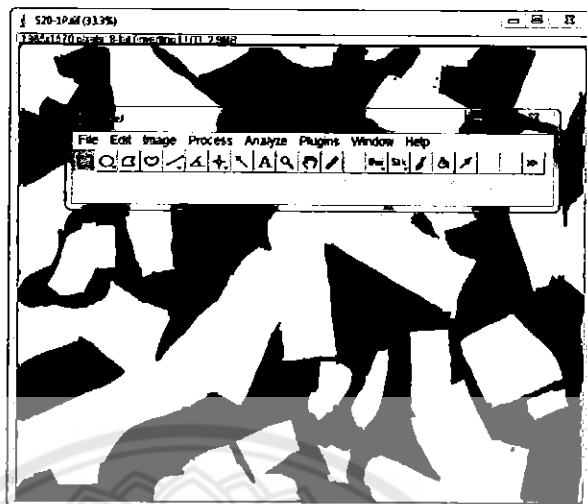
วิธีใช้งานโปรแกรม ImageJ

(a) เลือก File -> Open

(b) ทำการเปลี่ยนไฟล์รูปให้เป็น 8 บิต ที่เมนูบาร์ Image -> 8 bit

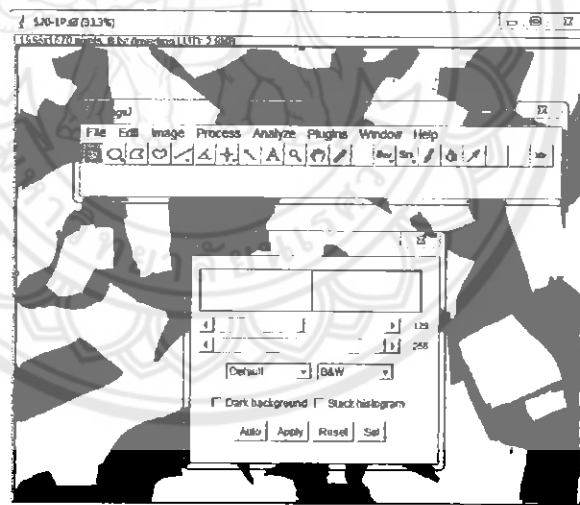
(c) กำหนดขอบเขตของรูปเพื่อทำการนับจำนวนจุดสีดำ ที่เมนูบาร์

Process -> Sharpen ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กำหนดขอบเขตของรูป

(d) กำหนดขอบเขตของการวัดที่เมนูบาร์ Image -> adjust -> Threshold จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กำหนดขอบเขตของการวัด

(e) เลือกเมนูบาร์ Analyze -> Analyze particle เลือกการแสดงผลตามที่ต้องการ ในที่นี้เลือก Summary จะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.14

Summary					
File	Edit	Font			
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
LL-2P.tif	7	536166.000	76595.143	17.603	255

รูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์จากรูป

3.9 การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง

3.9.1 วิธีใช้เครื่อง Universal Testing Machine และโปรแกรมบันทึกข้อมูล

เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เลขประจำเครื่อง 3416-008-003 วด.52/IE Shop IE ดังแสดงในรูปที่ 3.15 คือเครื่องที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน โดยใช้โหลด 5 kN และความเร็ว 2 mm/min



รูปที่ 3.15 เครื่อง Universal Testing Machine

3.9.1.1 วิธีใช้เครื่อง Universal Testing Machine

(a) เปิดโปรแกรม NEXYGEN Plus และ EZ Plus Series Software Console ดังรูปที่ 3.16

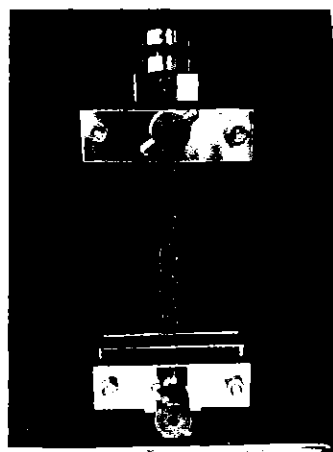


รูปที่ 3.16 โปรแกรม NEXYGEN Plus และ EZ Plus Series Software Console

(b) กดที่ Open an Existing Batch และตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมและเครื่องโดยใช้ Console

(c) เลือก File ชื่อ coconut fiber

(d) ติดตั้งชิ้นงานกับเครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ติดตั้งกับเครื่อง Universal Testing Machine

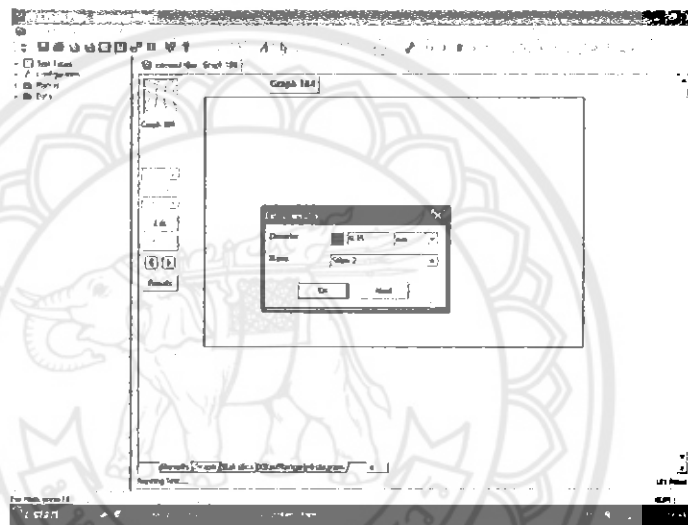
(e) เลือกแถบ Graph

(f) กดที่ปุ่ม New

(g) คลิก Start

(h) กำหนดขนาดของชิ้นงาน โดยโปรแกรมสามารถกำหนดได้ทั้ง

Diameter, Dimension หรือ Area แล้วคลิก OK ดังรูปที่ 3.18

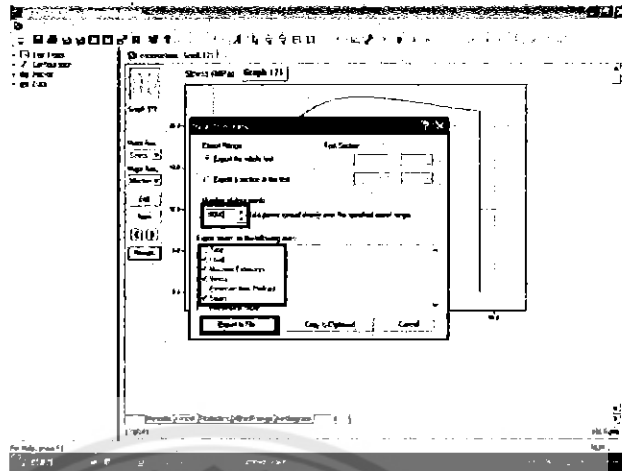


รูปที่ 3.18 กำหนดขนาดของชิ้นงาน

3.9.1.2 วิธีการนำข้อมูลออกจากโปรแกรม

(a) เปิดกราฟที่ต้องการแล้วคลิกขวา เลือก Data Point Export

(b) กำหนดค่า Number of data point ในที่นี่ใช้ 10000 แล้วทำเครื่องหมายถูกที่หน้า Load, Machine Extension, Stress, Strain จากนั้นคลิก Export to File... ดังรูปที่ 3.19

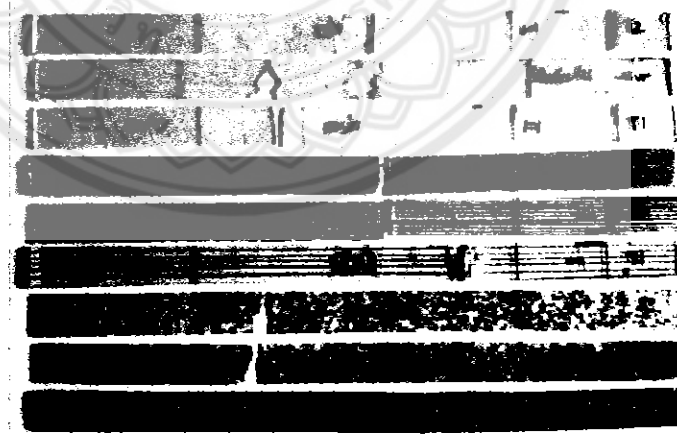


รูปที่ 3.19 กำหนดค่าที่ต้องการจะใช้งาน

(c) เลือกโฟลเดอร์ที่จะจัดเก็บ ในที่นี้เลือก ME Project แล้วกด Save

3.9.2 รูปแสดงจุดขาดของโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีเสริมแรง และเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น และเส้นใยยาว

เมื่อทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงจนวัสดุผสมขาดออกจากกัน แสดงลักษณะของจุดขาดดังที่แสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วัสดุผสมที่ขาดออกจากกันเมื่อได้รับแรงดึง

3.10 การวิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

นำผลความต้านแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าความเค้น ความเครียด วิเคราะห์หาค่าความต้านทานแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด (Elongation) พร้อมนำเสนอในรูปของกราฟเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบ และสรุปผลการดำเนินงาน



บทที่ 4

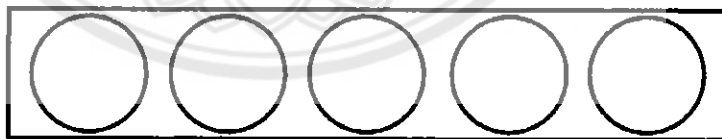
ผลการทดสอบ

4.1 การหาอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในวัสดุผสม

จากการทดสอบโดยการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D3039 ได้ชิ้นงานออกมาแบ่งเป็นโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น และโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว เมื่อดูภาพตัดขวางจะสังเกตได้ว่า โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น เส้นใยจะกระจายตัวอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบตลอดชิ้นงาน และโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว เส้นใยจะเรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกันตลอดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



(a) ลักษณะภาพตัดขวางโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น



(b) ลักษณะภาพตัดขวางโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิด

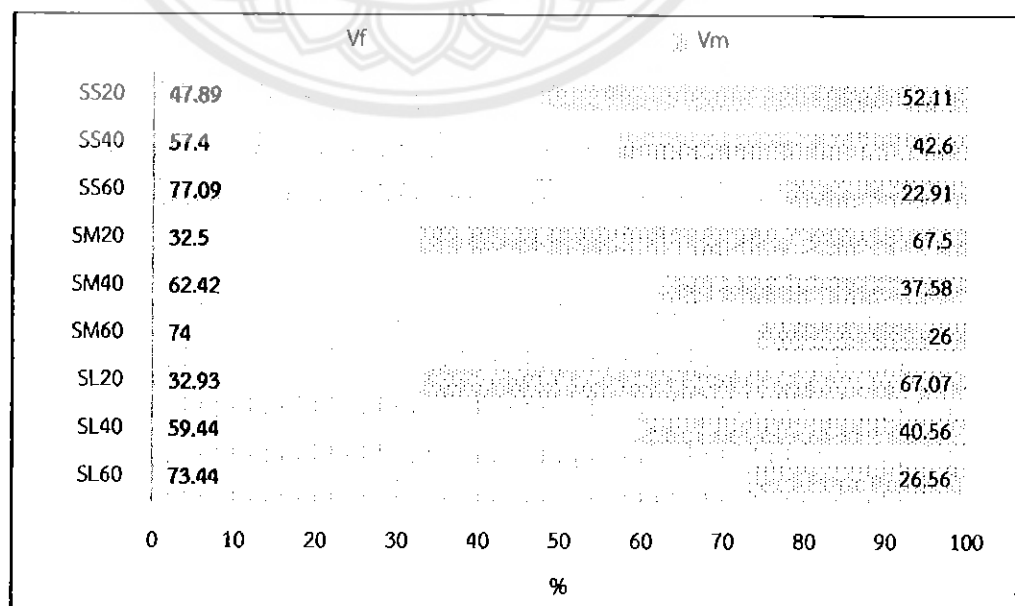
รูปที่ 4.1 ลักษณะภาพตัดขวางชิ้นงานของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม ImageJ ได้อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในวัสดุผสมดัง
ตารางที่ 4.1 สามารถดูตัวอย่างการคำนวณหาค่า V_f และ V_m จากหัวข้อ 3.8.1

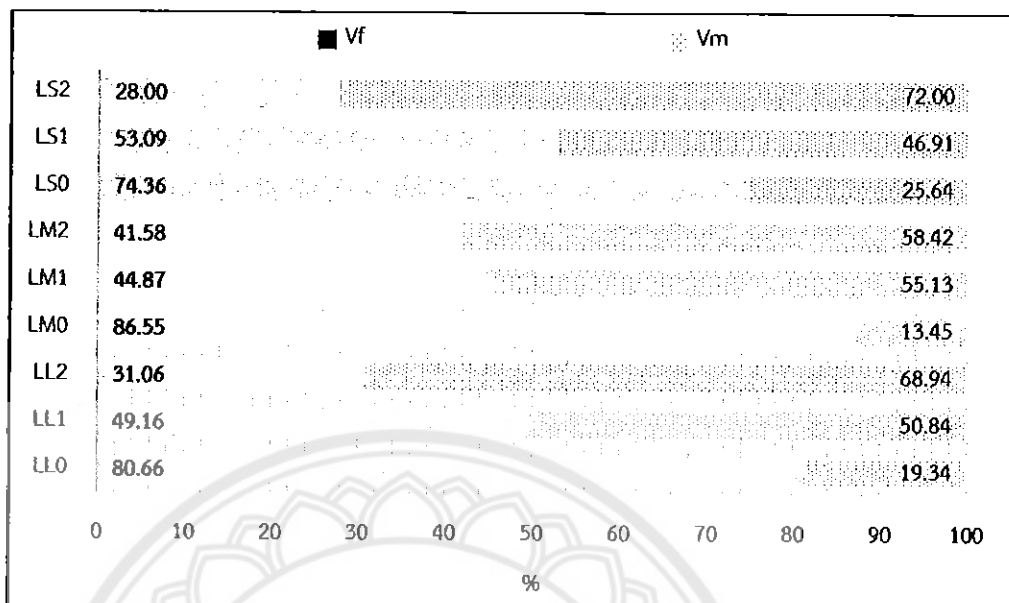
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในวัสดุผสม

Model	V_f (%)	V_m (%)	Model	V_f (%)	V_m (%)
SS20	47.89	52.11	LS2	28.00	72.00
SS40	57.40	42.60	LS1	53.09	46.91
SS60	77.09	22.91	LS0	74.36	25.65
SM20	32.50	67.50	LM2	41.58	58.42
SM40	62.42	37.58	LM1	44.87	55.13
SM60	74.00	26.00	LM0	86.55	13.45
SL20	32.93	67.07	LL2	31.06	68.94
SL40	59.44	40.56	LL1	49.16	50.85
SL60	73.44	26.56	LL0	80.66	19.34

(a) อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นในวัสดุผสม (b) อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวในวัสดุผสม



รูปที่ 4.2(a) อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นในวัสดุผสม



รูปที่ 4.2(b) อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวในวัสดุผสม

4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

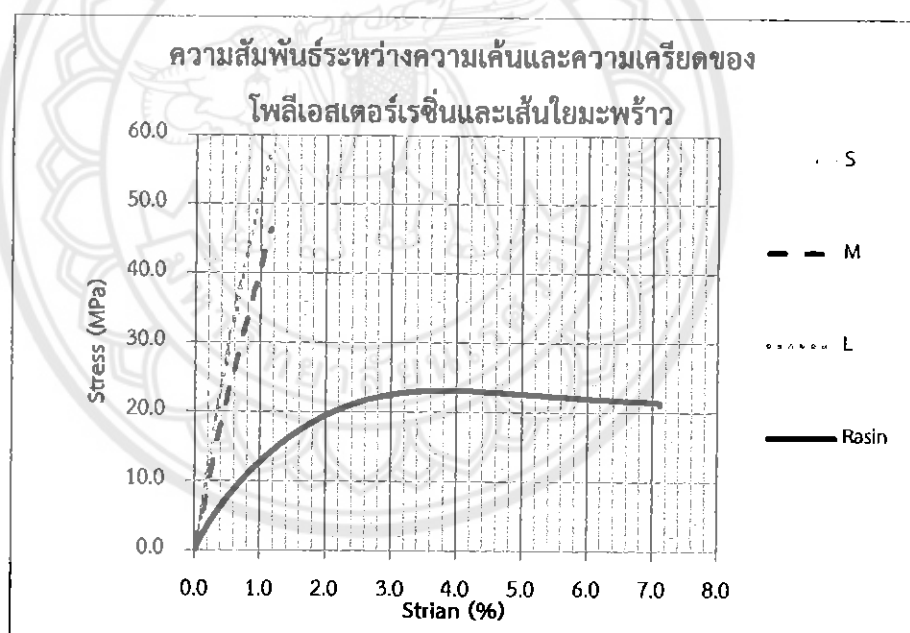
จากการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ได้ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง ดังนี้

4.2.1 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าว

ในตารางที่ 4.2 ระบุค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าว รวมถึงค่ามอดุลัส (E) จากตารางเส้นใยขนาด L มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงมากที่สุดเท่ากับ 61.57 MPa

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าว

Model	Maximum		Fracture		E (MPa)
	σ_U (MPa)	Elongation (%)	σ_F (MPa)	Elongation (%)	
โพลีเอสเตอร์เรซิน	23.11	3.87	21.03	7.31	4.46
เส้นใยขนาด S	41.99	0.77	39.77	0.79	61.73
เส้นใยขนาด M	52.03	1.30	51.28	1.33	42.85
เส้นใยขนาด L	61.57	1.25	61.47	1.31	53.69



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49 mm 0.59 mm และ 0.76 mm

รูปที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าวขนาด S M และ L จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า σ_U และ σ_F ของเส้นใยมะพร้าวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของเส้นใยมะพร้าว โดยที่เส้นใยมะพร้าวขนาด L มีค่าเฉลี่ยความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าของโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง เมื่อพิจารณาที่ค่า E จะเห็นว่า ค่า E ของโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรงมีค่าน้อยกว่าค่า E ของเส้นใยมะพร้าว

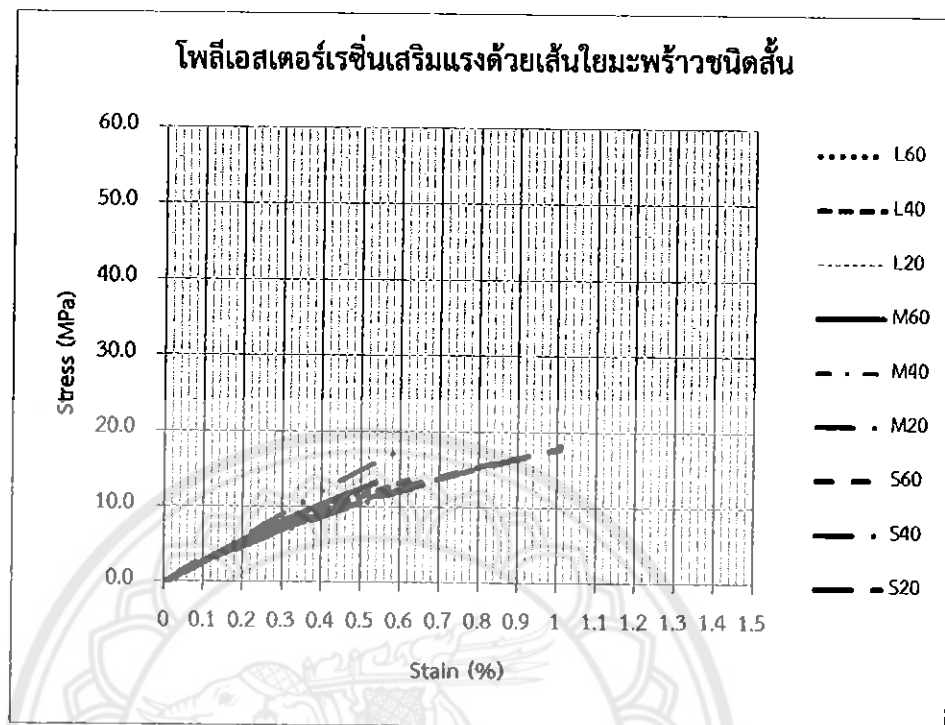
4.2.2 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น

โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น แบ่งตามอัตราส่วนของเส้นใยในงานเป็น 3 อัตราส่วน คือโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น $V_f=20\%$, $V_f=40\%$ และ $V_f=60\%$

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น

Model	Maximum		Fracture		E MPa
	σ_u (MPa)	Elongation (%)	σ_f (MPa)	Elongation (%)	
SS20	19.48	1.21	19.22	1.21	17.98
SS40	17.86	1.02	15.86	1.02	19.64
SS60	13.64	0.71	11.48	0.71	22.63
SM20	18.39	0.63	16.64	0.63	30.79
SM40	14.08	0.57	12.91	0.57	30.17
SM60	13.54	0.59	13.05	0.59	27.75
SL20	14.97	0.61	14.59	0.61	29.76
SL40	13.98	0.64	12.79	0.64	26.00
SL60	12.85	0.57	11.03	0.57	27.60

ในตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น ซึ่งโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น ขนาด S $V_f=20\%$ มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงมากที่สุดเท่ากับ 19.48 MPa



รูปที่ 4.4 โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น อัตราส่วนระหว่างเส้นใย และโพลีเอสเตอร์เรซิน 20%, 40% และ 60%

ค่าเฉลี่ยความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น $V_f = 20\%$, $V_f = 40\%$ และ $V_f = 60\%$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 ประกอบไปด้วยโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวขนาด S M และ L จะเห็นได้ว่าโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น ขนาด S $V_f = 20\%$ (SS20) มีความสามารถในการรับแรงดึงได้มากที่สุดเท่ากับ 19.48 MPa

4.1.3 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว

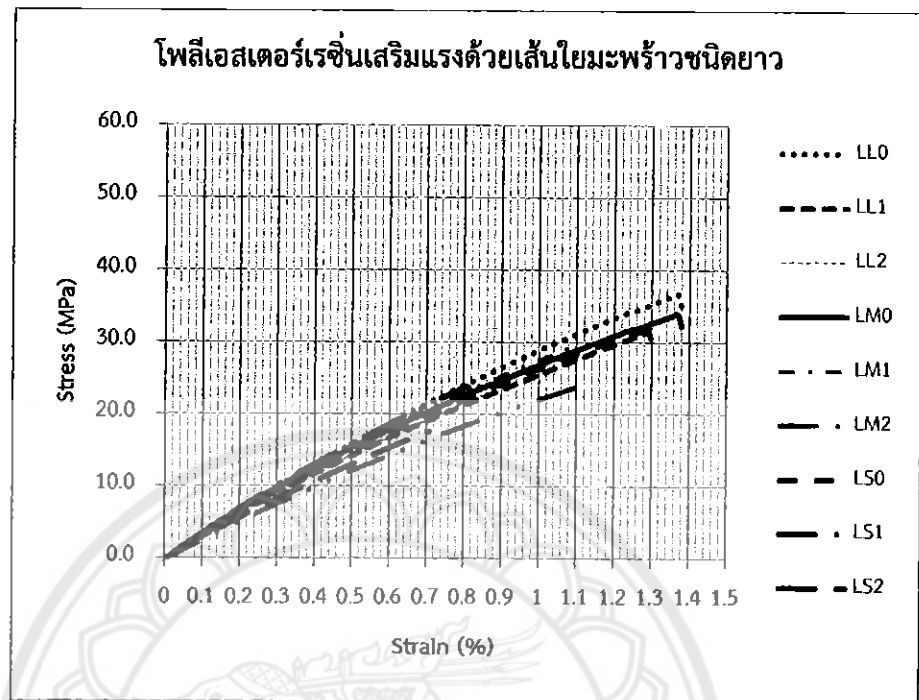
โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว แบ่งตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงานเป็น 3 แบบ คือ โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวแบบ LB0, LB1 และ LB2

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว

Model	Maximum		Fracture		E MPa
	σ_U (MPa)	Elongation (%)	σ_F (MPa)	Elongation (%)	
LS2	23.92	1.18	23.64	1.18	25.96
LS1	29.02	1.06	25.86	1.06	31.86
LS0	35.61	1.54	33.09	1.54	25.74
LM2	26.77	1.32	25.45	1.32	22.77
LM1	32.40	1.25	26.84	1.25	29.15
LM0	40.73	1.90	38.83	1.90	25.05
LL2	30.82	1.39	28.00	1.39	27.03
LL1	33.31	1.42	29.58	1.43	25.16
LL0	45.43	1.96	41.61	1.96	26.78

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว ซึ่งโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวขนาด L แบบเส้นใยเรียงชิดกัน (LL0) มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงมากที่สุดเท่ากับ 45.43 MPa

ค่าเฉลี่ยความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว แบ่งตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวในชิ้นงาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 ประกอบไปด้วยโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวขนาด S M และ L จะเห็นได้ว่าโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว ขนาด L แบบเส้นใยเรียงชิดกัน (LL0) มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงมากที่สุดเท่ากับ 45.43 MPa



รูปที่ 4.5 โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว แบ่งตามระยะห่างของเส้นใยมะพร้าวตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แบ่งเป็นแบบเรียงชิด เรียงห่าง 1 เส้น และห่าง 2 เส้น

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 วิเคราะห์อัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม

จากการทดลองทำการขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น และเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว โดยสำหรับโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น กำหนดให้อัตราส่วนผสมเส้นใยในโพลีเอสเตอร์เรซินเป็น 20% 40% และ 60% แต่จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ImageJ พบว่าอัตราส่วนของเส้นใยในชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการของการขึ้นรูปที่มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเส้นใยในชิ้นงาน รวมถึงจุดที่ถ่ายภาพชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนของเส้นใยในชิ้นงาน และการปรับสีของรูปถ่ายให้เป็น B/W ในโปรแกรม เมื่อรวมกันแล้วจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง และสำหรับโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่าอัตราส่วนผสมเส้นใยในโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นไปตามตารางที่ 5.2 และแสดงค่าอัตราส่วนของเส้นใย V_f และเมทริกซ์ V_m ในวัสดุผสม ในรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเฉลี่ยตัวแปรต่างๆของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น

Model	$V_{f,ac}$ (%)	V_f (%)	Z_{V_f}	σ_u (MPa)	σ_f (MPa)	E_c (MPa)	ϵ_u
SS20	20	47.89	139.45	19.48	19.22	17.98	1.21
SS40	40	57.40	43.50	17.86	15.86	19.64	1.02
SS60	60	77.09	28.48	13.64	11.48	22.63	0.71
SM20	20	32.50	62.50	18.39	15.29	34.61	0.63
SM40	40	62.42	56.05	14.08	12.91	30.17	0.57
SM60	60	74.00	23.33	13.54	13.05	27.75	0.59
SL20	20	32.93	64.65	14.97	14.59	29.76	0.61
SL40	40	59.44	48.60	13.98	12.79	26.00	0.64
SL60	60	73.44	22.40	12.85	11.03	27.60	0.57

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว

Model	V_f	σ_u (MPa)	σ_f (MPa)	E_c (MPa)	ϵ_u
LS2	28.00	23.92	23.64	25.96	1.18
LS1	53.09	29.02	25.86	31.86	1.06
LS0	74.36	35.61	33.09	25.74	1.54
LM2	34.33	26.77	25.45	22.77	1.32
LM1	44.87	32.40	26.84	29.15	1.25
LM0	86.55	40.73	38.83	25.05	1.90
LL2	31.06	30.82	28.00	27.03	1.39
LL1	49.16	33.31	29.58	25.16	1.42
LL0	80.66	45.43	41.61	26.78	1.96

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Z) ของตัวแปรต่างๆในวัสดุผสม

สามารถหาได้จาก
$$Z = \frac{|\text{ค่าที่ทดลองได้} - \text{ค่าจากการประมาณการ}|}{\text{ค่าจากการประมาณการ}} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 5.1})$$

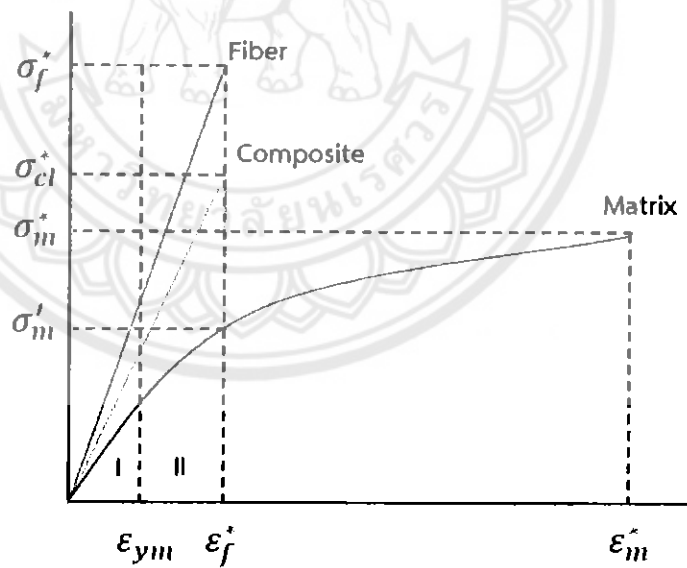
จากผลการหาค่า V_f ในวัสดุที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว แบบ LS2, LM2 และ LL2 มีค่า V_f อยู่ในช่วง 25%-35% แบบ LS1, LM1 และ LL1 มีค่า V_f อยู่ในช่วง 45%-55% แบบ LS0, LM0 และ LL0 มีค่า V_f อยู่ในช่วง 75%-85%

5.2 ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยมะพร้าว

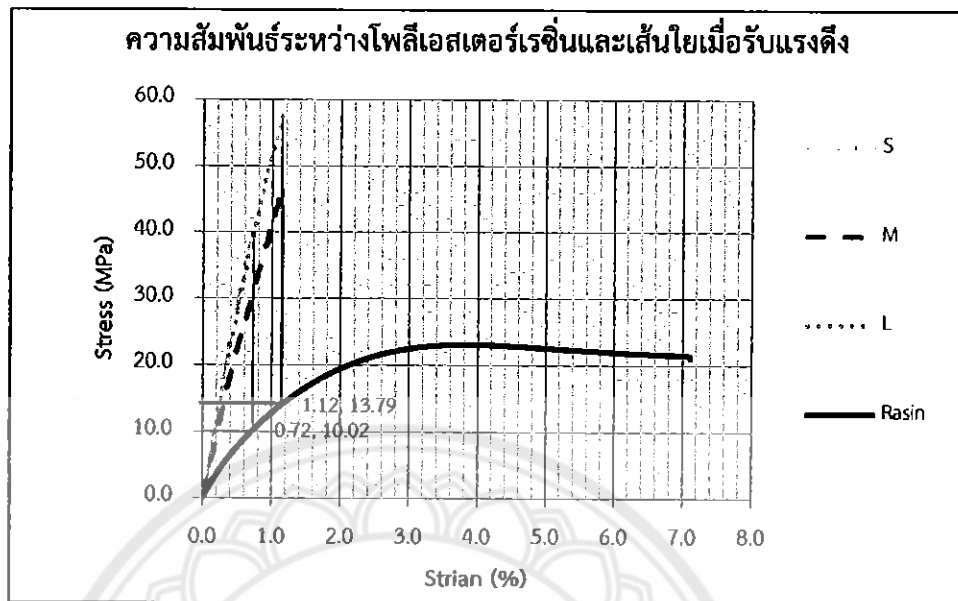
เส้นใยมะพร้าวขนาด S M L และโพลีเอสเตอร์เรซิน มีความสามารถในการต้านทานแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าเส้นใยมะพร้าวสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าโพลีเอสเตอร์เรซิน

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยมอดูลัสของเส้นใยมะพร้าวและโพลีเอสเตอร์เรซิน

Model	σ_u (MPa)	σ_f (MPa)	E (MPa)	ϵ_u
โพลีเอสเตอร์เรซิน	23.11	21.03	4.46	3.87
เส้นใยขนาด S	41.99	39.77	61.73	0.77
เส้นใยขนาด M	52.03	51.28	42.85	1.30
เส้นใยขนาด L	61.57	61.47	53.69	1.25



รูปที่ 5.1a ความสัมพันธ์ระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยเมื่อรับแรงดึงจากทฤษฎี



รูปที่ 5.1b ความสัมพันธ์ระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยเมื่อรับแรงดึงจากการทดลอง

จากรูปที่ 5.1b และตารางที่ 5.3 เมื่อให้แรงดึงกับเส้นใยและเมทริกซ์ เส้นใยจะไม่มีช่วงการยืดตัว โดยเส้นใยแสดงถึงคุณลักษณะของวัสดุที่มีความเปราะ และไม่มีการยืดหยุ่น คือเส้นใยจะมีค่า σ_u สูง ϵ_u ต่ำ และ E สูง จึงทำให้เส้นใยขาดโดยไม่แสดงสภาพการยืดหยุ่น และโพลีเอสเตอร์เรซินจะแสดงคุณลักษณะของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง คือโพลีเอสเตอร์เรซินจะมีค่า σ_u ต่ำ ϵ_u สูง และ E ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.1a ผลการทดสอบสอดคล้องกับการทดสอบแรงดึง สามารถคาดการณ์ได้ว่าวัสดุผสมควรจะมีค่า σ_u อยู่ในช่วง 23.11- 41.99 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด S มีค่า σ_u อยู่ในช่วง 23.11-52.03 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด M และมีค่า σ_u อยู่ในช่วง 23.11-61.57 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด L จากรูปที่ 5.1b จะสังเกตได้ว่า เส้นใยขนาด S ยังมีค่า σ'_m ที่ 10.02 MPa เส้นใยขนาด M และ L มีค่า σ'_m ที่ 13.79 MPa และวัสดุผสมควรจะมีค่า E อยู่ในช่วง 4.46-61.73 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด S มีค่า E อยู่ในช่วง 4.46-42.85 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด M และมีค่า E อยู่ในช่วง 4.46-53.69 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด L

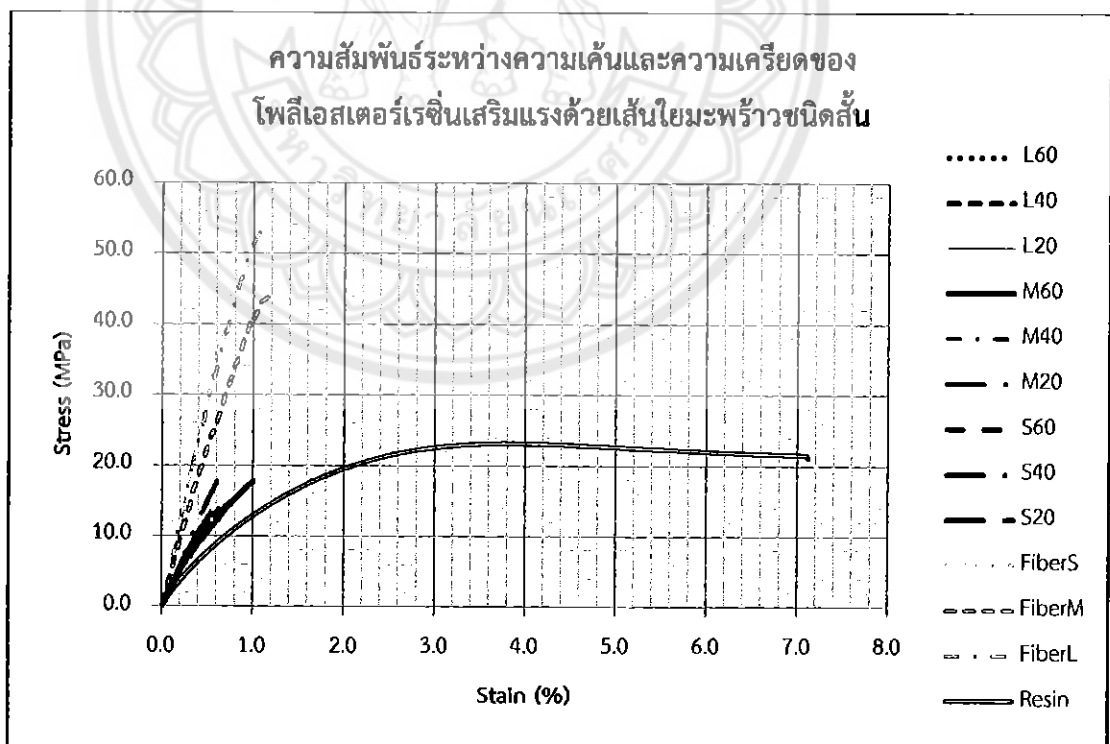
5.3 ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น

5.3.1 ค่าความเค้นสูงสุด (σ_u) ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

เมื่อให้แรงดึงกับวัสดุผสม วัสดุผสมแสดงคุณลักษณะอยู่ระหว่างเส้นใยและโพลีเอสเตอร์เรซิน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยที่ความต้านทานแรงดึง (σ_u) ของวัสดุผสมมีค่าน้อยกว่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) ของเมทริกซ์ และเส้นใย

5.3.2 ค่ามอดูลัส (E) ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าวัสดุผสมมีค่ามอดูลัสมากกว่าเมทริกซ์ แต่น้อยกว่าเส้นใย คือยังมีค่ามอดูลัสอยู่ในช่วง 4.46-61.73 MPa ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาด S M และ L ดังแสดงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น อัตราส่วนระหว่างเส้นใยและโพลีเอสเตอร์เรซิน 20%, 40% และ 60%

5.3.3 ประสิทธิภาพในการเสริมแรง (K) ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

ในวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบจะมีค่าประสิทธิภาพของการเสริมแรงจะอยู่ในช่วง 0.1 - 0.6[3] จากการทดลองสามารถหาค่า K ได้จากสมการที่ 5.3 ซึ่งแสดงค่าที่คำนวณได้อยู่ในตารางที่ 5.4

$$K = \frac{E_c - E_m(1 - V_f)}{E_f V_f} \quad (\text{สมการที่ 5.3})$$

เมื่อ

- K = ประสิทธิภาพของการเสริมแรง
- E_c = ค่ามอดูลัสของวัสดุผสม
- E_m = ค่ามอดูลัสของเมทริกซ์
- E_f = ค่ามอดูลัสของเส้นใย
- V_f = อัตราส่วนของเส้นใยในชิ้นงาน

ตัวอย่างการคำนวณ : วิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพของการเสริมแรงภาพของ SS20 (ข้อมูลจากตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.3)

SS20	
E_c	17.98 MPa
E_f	61.73 MPa
E_m	4.46 MPa
V_f	0.48

$$K = \frac{17.98 - (4.46)(1 - 0.48)}{(61.73)(0.48)}$$

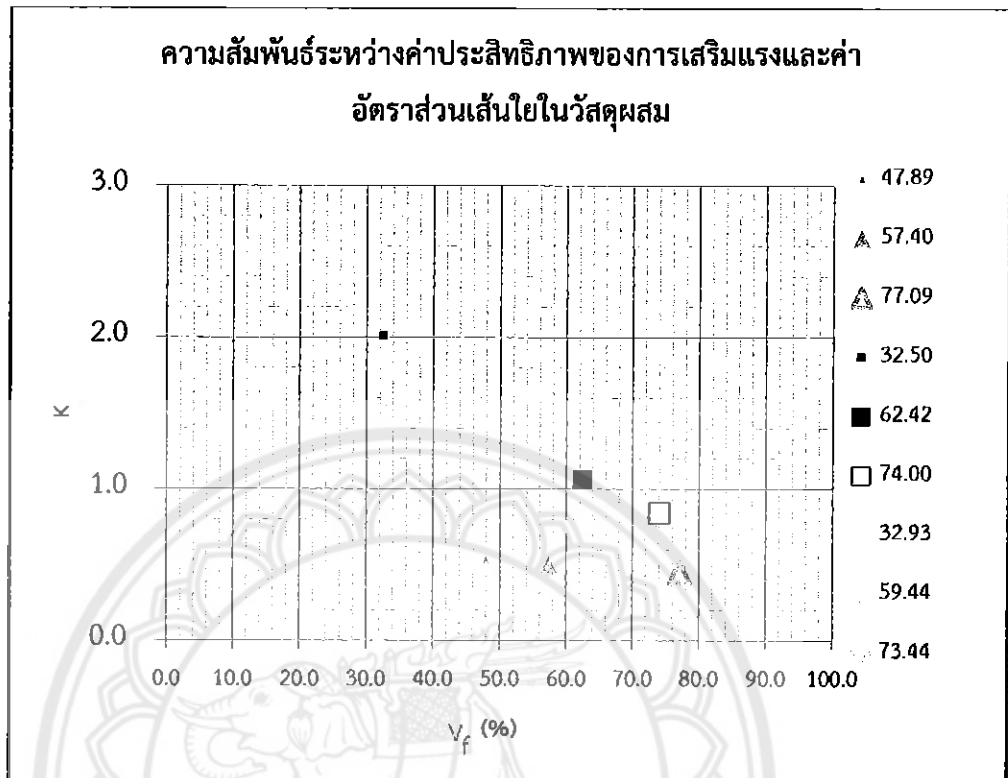
เพราะฉะนั้น K = 0.53

ตารางที่ 5.4 แสดงค่า K ของวัสดุผสมแต่ละชิ้นและค่า K เฉลี่ยของวัสดุผสม

เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.49 mm			เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.59 mm			เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.76 mm		
Model	K	K (เฉลี่ย)	Model	K	K (เฉลี่ย)	Model	K	K (เฉลี่ย)
SS20	SS20-1	0.56	SM20	SM20-1	2.31	SL20	SL20-1	1.30
	SS20-2	0.50		SM20-2	1.99		SL20-2	1.88
	SS20-3	0.53		SM20-3	1.74		SL20-3	1.45
SS40	SS40-1	0.48	SM40	SM40-1	1.04	SL40	SL40-1	0.78
	SS40-2	0.48		SM40-2	1.10		SL40-2	0.79
	SS40-3	0.55		SM40-3	1.04		SL40-3	0.70
SS60	SS60-1	0.47	SM60	SM60-1	0.90	SL60	SL60-1	0.60
	SS60-2	0.41		SM60-2	0.76		SL60-2	0.68
	SS60-3	0.48		SM60-3	0.85		SL60-3	0.74

จากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพของการเสริมแรงมีค่าอยู่ในช่วง 0.45 – 2.01 ดังแสดง
ในตารางที่ 5.4 โดยค่า K จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเส้นใยในชิ้นงาน (V_f) และค่าอัตราส่วน $\frac{E_f}{E_m}$

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าค่า K อยู่ในช่วง 0.1-1 ยกเว้นแบบ SM20 SM40 และ SL20 ที่มีค่า K เกิน 1 ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางทฤษฎี จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.3 และใช้ค่า E_c จากตารางที่ 5.1 พบว่าเมื่อวัสดุผสมมีค่า E_c อยู่ประมาณ 30 MPa จะทำให้มีค่า K ที่มากกว่า 1



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของการเสริมแรงและค่าอัตราส่วนของเส้นใยชนิดสั้นในวัสดุผสม

5.3.4 ผลของความยาวของเส้นใยในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

ความยาววิกฤตมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) และค่ามอดูลัส (E) ของวัสดุคอมโพสิต โดยค่าความยาววิกฤตจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดคราก (shear yield strength) ของเมทริกซ์ มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 5.2 และแสดงค่าความยาววิกฤตไว้ในตารางที่ 5.5

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (\text{สมการที่ 5.2})$$

- เมื่อ l_c คือความยาววิกฤต
 σ_f^* คือความแข็งแรงสูงสุด หรือความต้านทานแรงดึงของเส้นใย
 d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

τ_c คือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดร้าวของเมทริกซ์

ตัวอย่างการคำนวณ : วิธีคำนวณค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดร้าวของเมทริกซ์ (τ_c)
(ข้อมูลจากตารางที่ 5.3)

τ_c	
σ_u	23.11 MPa

$$\tau_c = \frac{23.11}{2}$$

เพราะฉะนั้น $\tau_c = 11.56$ MPa

ตัวอย่างการคำนวณ : วิธีการคำนวณค่าความยาววิกฤตของเส้นใยขนาด S (ข้อมูลจากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.3)

Fiber S	
σ_f^*	41.99 MPa
d	0.49 mm
τ_c	11.56 MPa

$$l_c = \frac{41.99 \times 0.49}{2 \times 11.56}$$

เพราะฉะนั้น $l_c = 0.89$ mm

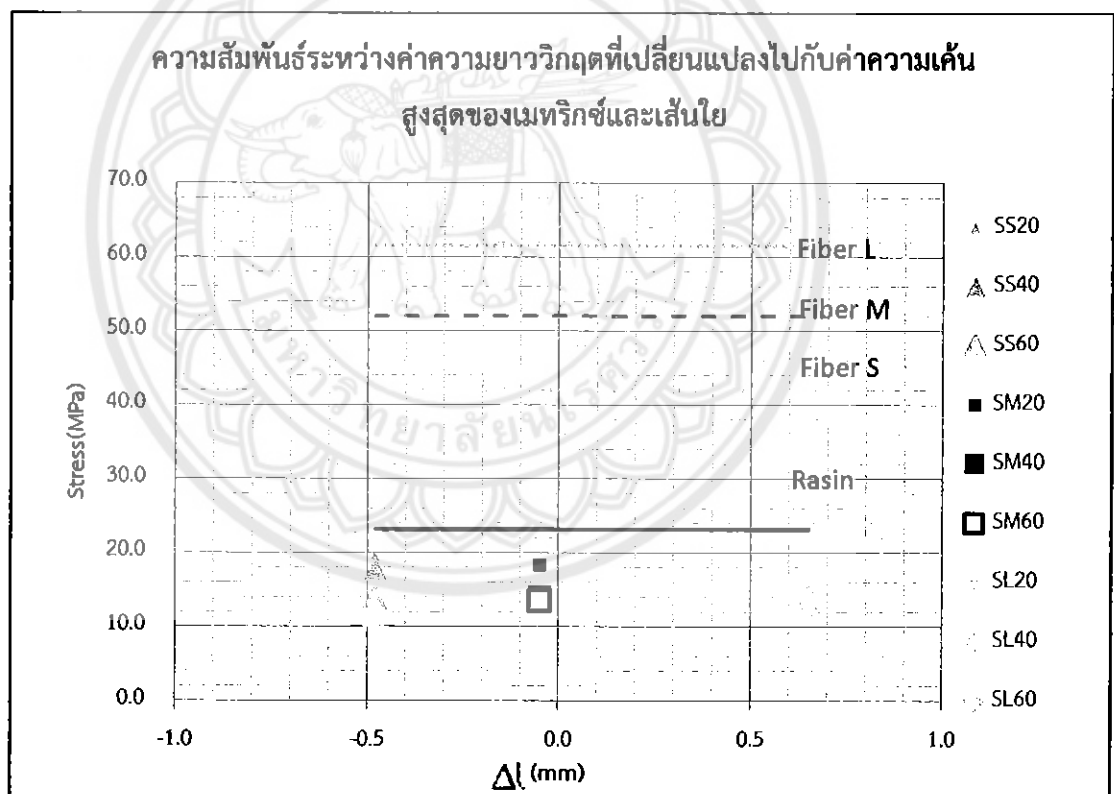
ตารางที่ 5.5 ค่าความยาววิกฤตของเส้นใยขนาด S, M และ L

Model	l_c (mm)	$\Delta l = l_c - l$ (mm)
เส้นใยขนาด S	0.89	- 0.48
เส้นใยขนาด M	1.32	- 0.05
เส้นใยขนาด L	2.02	+ 0.65

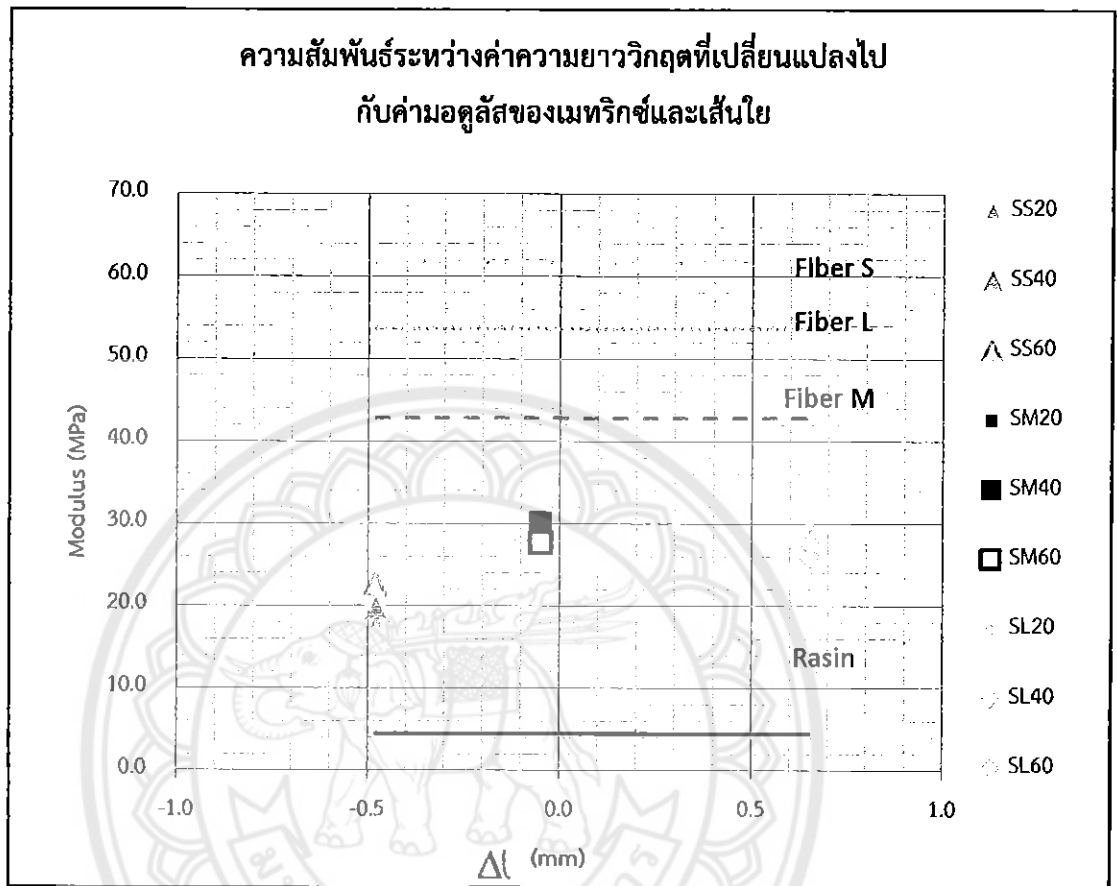
จากการวัดค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงตัวอย่างรูปถ่ายและสเกลในการวัดในรูปที่ 5.4 พบว่าเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความยาวเฉลี่ย 1.37 mm



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และสเกลในการวัด



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาววิกฤตที่เปลี่ยนแปลงไป
กับค่าความเค้นสูงสุดของเมทริกซ์และเส้นใย



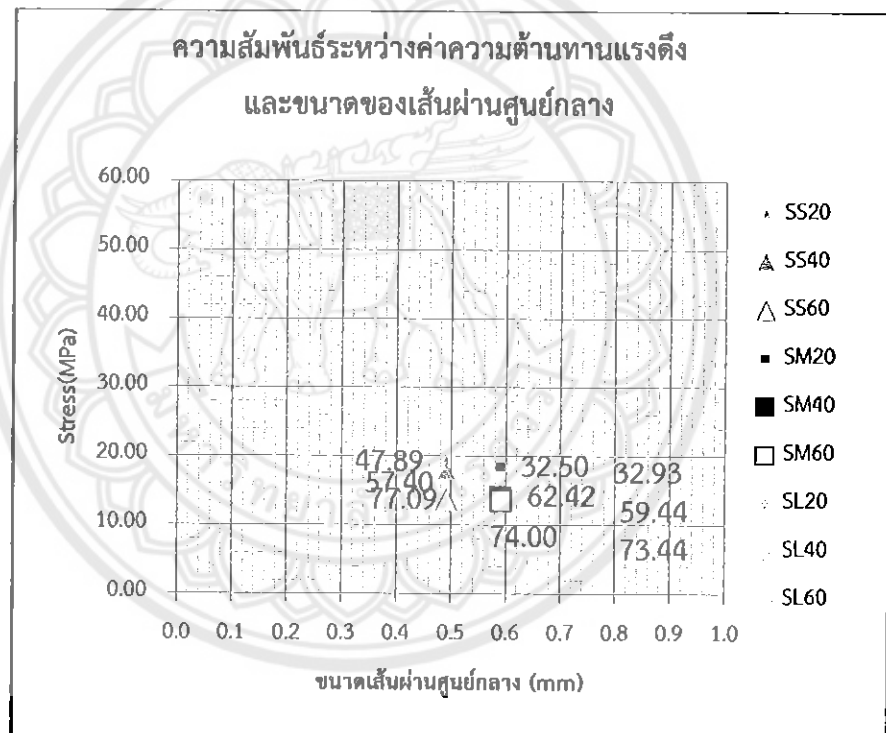
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาววิกฤตที่เปลี่ยนแปลงไป
กับค่ามอดูลัสของเมทริกซ์และเส้นใย

จากตารางที่ 5.5 พบว่าความยาวของเส้นใยสั้นมีความยาวมากกว่าความยาววิกฤตของเส้นใยขนาด S และ M แต่มีความยาวน้อยกว่าความยาววิกฤตของเส้นใยขนาด L และจากรูปที่ 5.5 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของเมทริกซ์และเส้นใย เพราะในการทดลอง การกระจายตัวของเส้นใยไม่ได้อยู่ในแนวของแรงดึง และจากรูปที่ 5.6 ค่ามอดูลัสของวัสดุผสมมีค่ามากกว่าค่ามอดูลัสของเมทริกซ์ แต่น้อยกว่าค่ามอดูลัสของเส้นใย

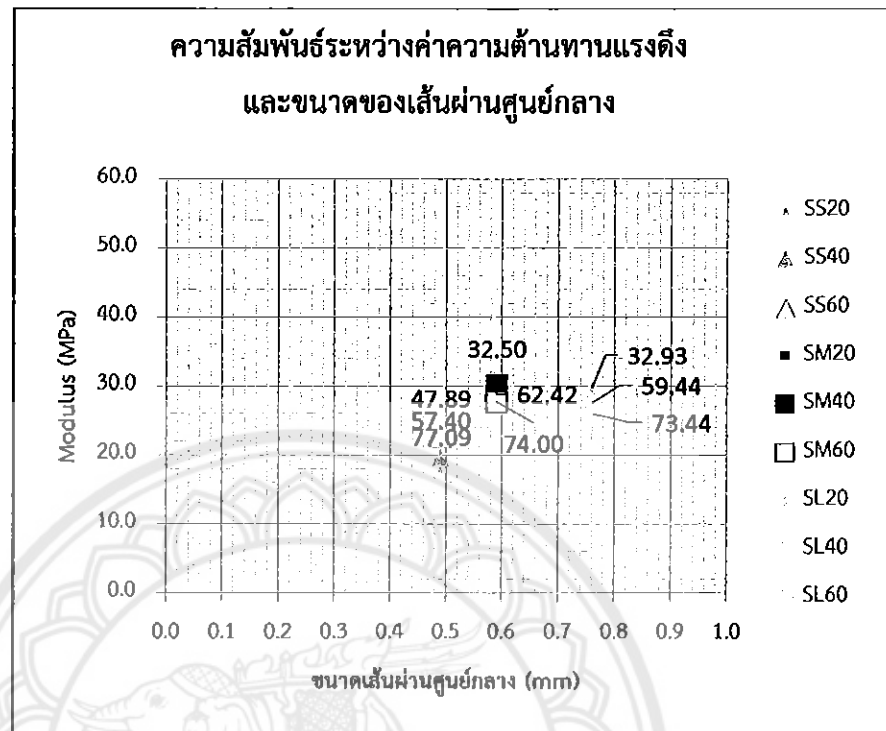
5.3.5 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในเส้นใยสั้นในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

จากรูปที่ 5.7 เมื่อพิจารณาจากวัสดุผสมที่มีค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสมใกล้เคียงกัน พบว่า เมื่อเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ความต้านทานแรงดึงน้อยลง เนื่องจากเส้นใย

เรียงตัวไม่เป็นระเบียบและไม่อยู่ในแนวของแรงดึง ทำให้โพลีเอสเตอร์เรซินเป็นส่วนที่รับแรงดึง โดยเมื่อเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื้อของโพลีเอสเตอร์เรซินก็น้อยลงทำให้รับแรงดึงได้น้อยลง อีกทั้งเมื่อเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น พันธะระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินและเส้นใยไม่แข็งแรง ทำให้วัสดุผสมมีการรับแรงดึงได้น้อยลง และค่ามอดูลัสจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย 0.59 mm และค่ามอดูลัสจะลดลงเมื่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมากกว่า 0.59 mm – 0.76 mm ดังรูปที่ 5.8 โดยค่าตัวเลขของแต่ละจุดคือค่า V_f ของวัสดุผสมแต่ละแบบ



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

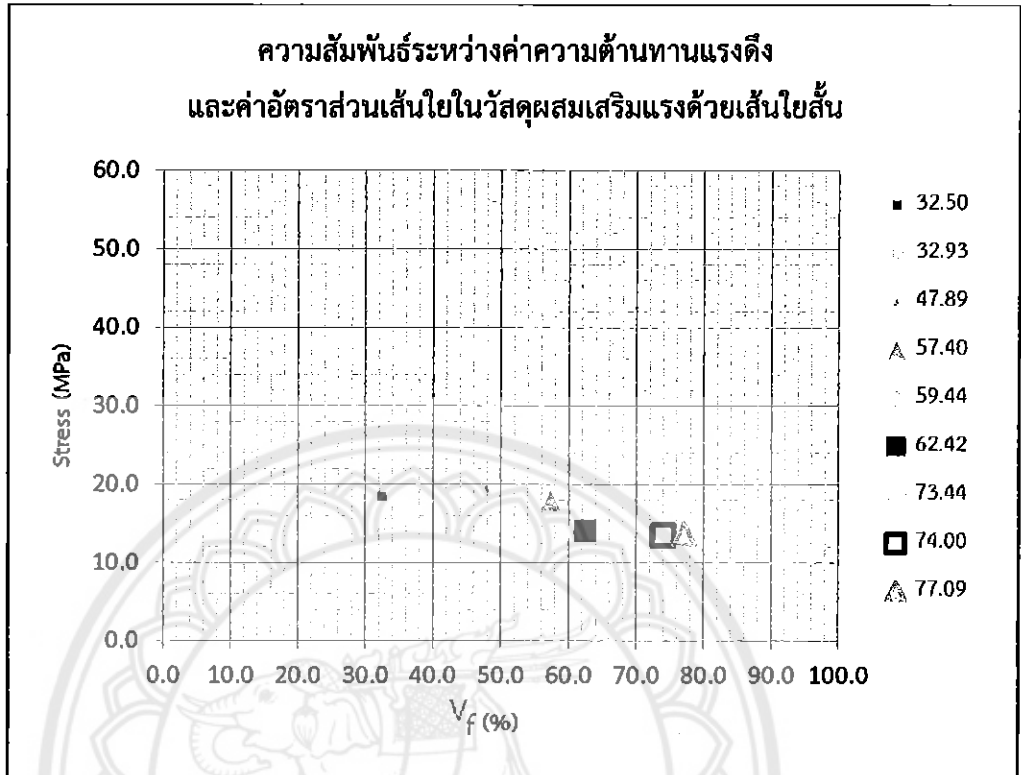


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

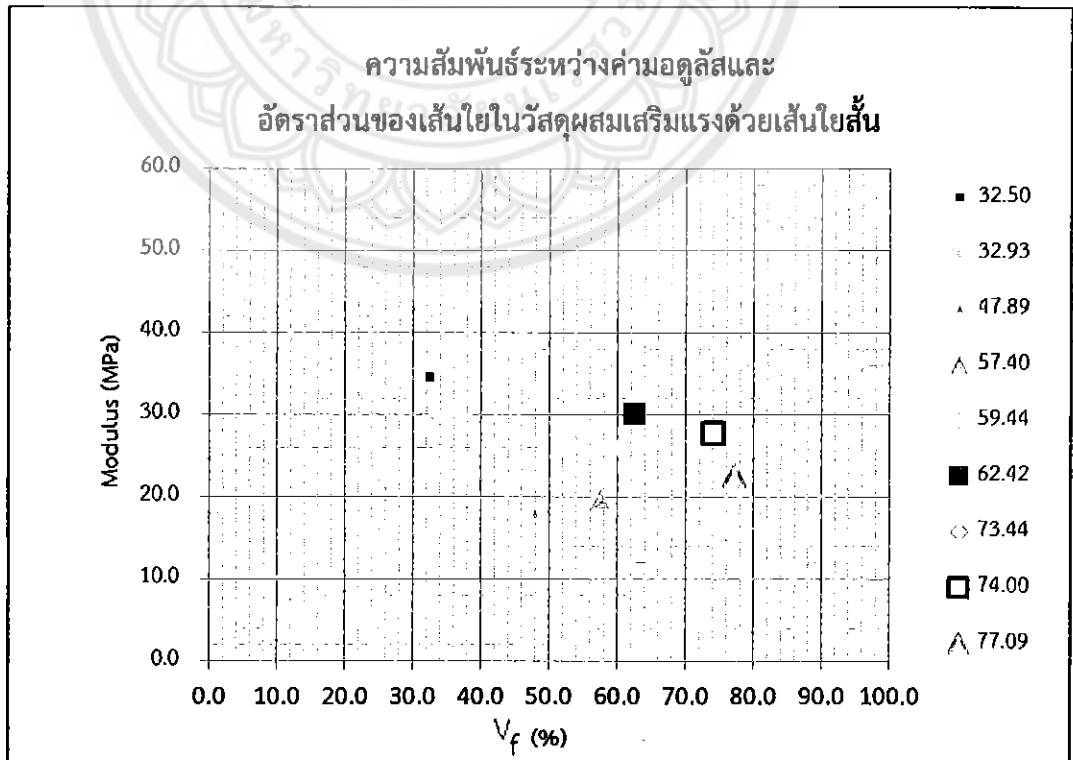
5.3.6 ผลของ v_f ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

จากตารางที่ 5.1 พบว่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสม (σ_u) มีค่าน้อยกว่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซิน อาจเกิดจากตอนที่ผสมส่วนผสมของโพลีเอสเตอร์เรซิน รวมถึงขณะเทส่วนผสมลงในแบบขึ้นรูปและเกลี่ยให้ทั่วแบบขึ้นรูป ทำให้เกิดฟองอากาศในวัสดุผสม และเส้นใยยังกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในวัสดุผสม ทำให้ตรงจุดที่เกิดฟองอากาศ ไม่มีเนื้อของโพลีเอสเตอร์เรซินหรือเส้นใยอยู่ ทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อย เมื่อสังเกตจากรูปที่ 5.9 จะพบว่าค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) จะสูงขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่ $v_f = 47.89\%$ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ v_f เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5.10 วัสดุผสมที่มีค่า v_f อยู่ในช่วง 32.50-47.89% มีแนวโน้มที่ค่า E จะลดลง วัสดุผสมที่มีค่า v_f อยู่ในช่วง 57.40-62.42% มีแนวโน้มที่ค่า E จะเพิ่มขึ้นและวัสดุผสมที่มีค่า v_f อยู่ในช่วง 73.44-77.09% จะมีแนวโน้มที่ค่า E จะลดลง



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนเส้นใยสั้นในวัสดุผสม

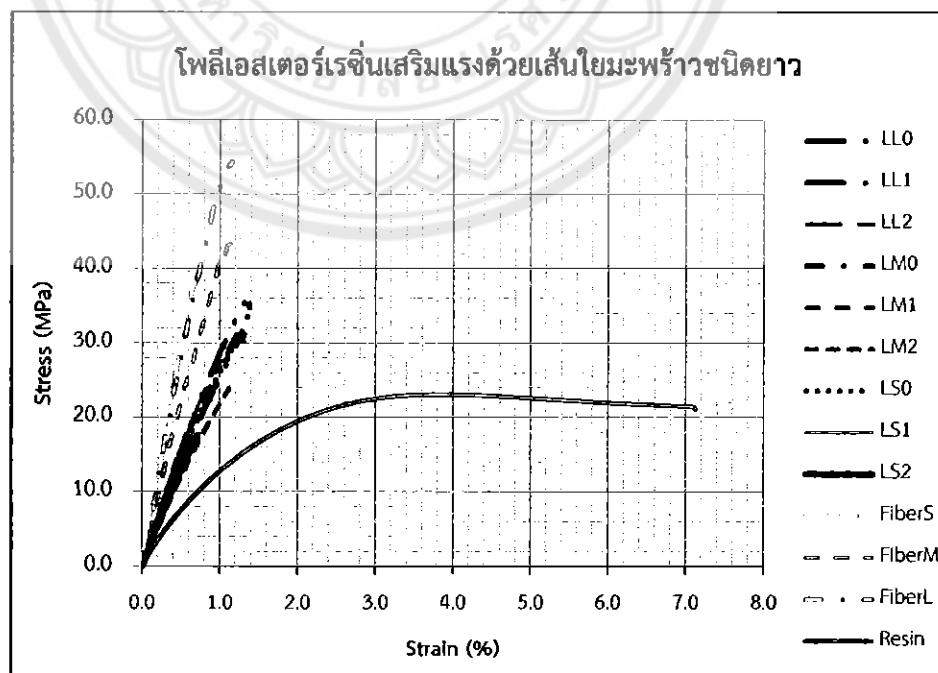


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและค่าอัตราส่วนเส้นใยสั้นในวัสดุผสม

5.4 ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว

5.4.1 ค่าความเค้นสูงสุด (σ_u) ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว

รูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว ที่เกิดจากการผสมกันระหว่างเส้นใยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูง แต่มีความยืดหยุ่นน้อย กับโพลีเอสเตอร์เรซินที่เป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อย แต่มีความยืดหยุ่นในตัวสูง โดยจากการคาดการณ์เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาผสมขึ้นรูปรวมกันแล้ว คุณลักษณะของวัสดุผสมควรจะอยู่ในระหว่างกลางของวัสดุทั้งสองชนิด จากกราฟในรูปที่ 5.11 เมื่อนำกราฟของวัสดุผสมมาเปรียบเทียบกับกราฟของเส้นใยมะพร้าวจะพบว่าค่าความเค้นสูงสุดนั้นมีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำกราฟของวัสดุผสมมาเปรียบเทียบกับกราฟของโพลีเอสเตอร์เรซินจะพบว่าค่าความเค้นสูงสุดนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของวัสดุผสมที่ทำการทดลองอยู่ในระหว่างกลางระหว่างคุณลักษณะของเส้นใยมะพร้าวกับโพลีเอสเตอร์เรซิน ซึ่งเป็นไปตามความคาดหมายของการขึ้นรูปวัสดุผสม



รูปที่ 5.11 คุณลักษณะของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว,โพลีเอสเตอร์เรซิน และเส้นใยมะพร้าวขนาดต่างๆ

ค่าความต้านทานแรงดึง จากสมการที่ 2.8 ในบทที่ 2 ใช้คำนวณสำหรับวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแบบยาวต่อเนื่องเรียงตัวขนานกัน วัสดุผสมนั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงในแนวขนานกับคอมโพสิต (σ_{cl}^*) เท่ากับ

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m'(1-V_f) + \sigma_f^*V_f$$

ตัวอย่างการคำนวณ : วิธีการคำนวณค่า σ_{cl}^* Model LS2 (ค่าจากตารางที่ 5.6)

LS2	
σ_m'	10.55 MPa
σ_f^*	41.99 MPa
V_f	0.28

$$\sigma_{cl}^* = \{(10.55)(1-0.47)\} + (41.99)(0.47)$$

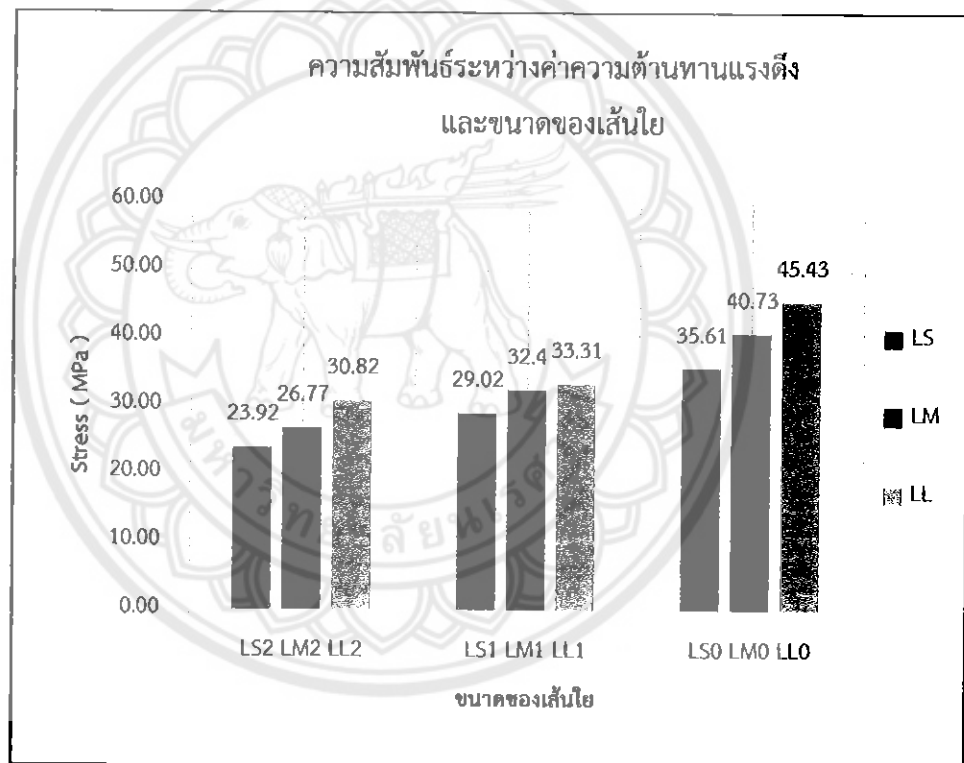
เพราะฉะนั้น $\sigma_{cl}^* = 19.35$ MPa

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการประมาณด้วยสมการและความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

Model	ค่าจากการทดลอง				ค่าจากการคำนวณ	
	V_f (%)	σ_m' (MPa)	σ_f^* (MPa)	σ_u (MPa)	σ_{cl}^* (MPa)	Z_{Ed}^*
LS2	28.00	10.55	41.99	23.92	19.35	19
LS1	53.09	10.55	41.99	29.02	25.29	13
LS0	74.36	10.55	41.99	35.61	33.93	5
LM2	34.33	15.25	52.03	26.77	27.88	4
LM1	44.87	15.25	52.03	32.40	31.75	2
LM0	86.55	15.25	52.03	40.73	47.08	16
LL2	31.06	14.82	61.57	30.82	29.34	5
LL1	49.16	14.82	61.57	33.31	37.80	13
LL0	80.66	14.82	61.57	45.43	52.53	16

จากตาราง 5.6 จะเห็นว่าค่าความต้านทานแรงดึงจากการทดลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการในบทที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากสังเกตได้จาก ค่า Z ที่

แสดงในตาราง โดยความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทำการทดลอง สภาพแวดล้อมในการขึ้นรูปชิ้นงาน และเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงที่ใช้เป็นเส้นใยจากธรรมชาติทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติไม่คงที่เท่าที่ควรซึ่งเป็นอุปสรรคในการทดลองรวมทั้งยังมีผลโดยตรงกับผลการทดลองและ ในตารางที่ 5.6 พบว่าชิ้นงานที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว แบบ LLO สามารถต้านทานแรงดึงได้สูงสุดเท่ากับ 45.43 MPa และชิ้นงานที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว แบบ LS2 สามารถต้านทานแรงดึงได้น้อยที่สุดเท่ากับ 23.92 MPa ตามที่แสดงในรูปที่ 5.12 โดยตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึง ประกอบด้วย ขนาดของเส้นใย และ ค่า V_f



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและขนาดของเส้นใย

5.4.2 ค่ามอดูลัส (E) ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว

เมื่อพิจารณาที่ค่ามอดูลัสจากกราฟในรูปที่ 5.11 พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีค่ามอดูลัสสูงกว่าโพลีเอสเตอร์เรซิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการเสียรูปได้น้อยกว่าโพลีเอสเตอร์เรซิน เมื่อนำกราฟของวัสดุผสมมาเปรียบเทียบกับกราฟของเส้นใยมะพร้าวจะพบว่าค่ามอดูลัสนั้นมีแนวโน้มลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการผสมโพลีเอสเตอร์เรซินที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าเส้นใยทำให้วัสดุผสมสามารถยืดตัวได้มากขึ้น และเมื่อนำกราฟของวัสดุผสมมาเปรียบเทียบกับกราฟของโพลีเอสเตอร์เรซินจะพบว่าค่ามอดูลัส

นั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการผสมเส้นใยมะพร้าวทำให้โพลีเอสเตอร์เรซินยึดตัวได้น้อยลง จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของวัสดุผสมจะอยู่ในระหว่างกลางระหว่างคุณลักษณะของเส้นใยมะพร้าวกับโพลีเอสเตอร์เรซิน ซึ่งเป็นไปตามความคาดหวังของการขึ้นรูปวัสดุผสม

ค่ามอดูลัสในแนวขนานกับคอมโพสิต (E_{cl}) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.6

$$E_{cl} = E_m (1 - V_f) + E_f V_f$$

ตัวอย่างการคำนวณ : วิธีการคำนวณค่า E_{cl} Model LS2 (ค่าจากตารางที่ 5.7)

LS2	
E_m	4.46 MPa
E_f	61.73 MPa
V_f	0.28

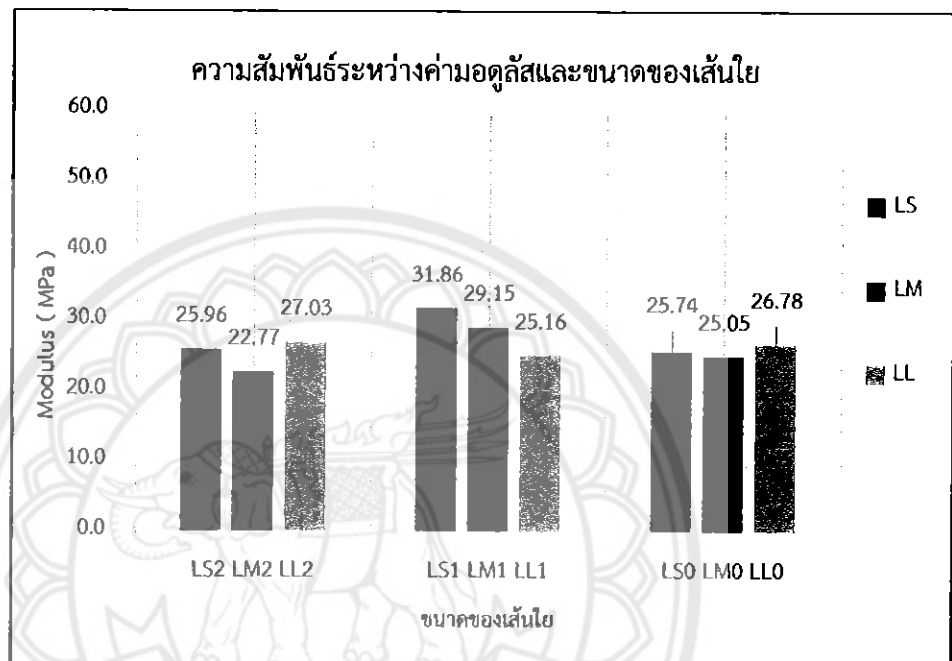
$$E_{cl} = 4.46(1 - 0.28) + (61.73 \times 0.28)$$

เพราะฉะนั้น $E_{cl} = 20.50$ MPa

ตารางที่ 5.7 แสดงค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวและค่าความคลาดเคลื่อน

Model	การทดลอง				การคำนวณ	
	V_f (%)	E_m (MPa)	E_f (MPa)	E_c (MPa)	E_{cl} (MPa)	$Z_{E_{cl}}$ (%)
LS2	28.00	4.46	61.73	25.96	20.50	21
LS1	53.09	4.46	61.73	31.86	31.33	2
LS0	74.36	4.46	61.73	25.74	47.05	83
LM2	34.33	4.46	42.83	22.77	17.31	24
LM1	44.87	4.46	42.83	29.15	21.68	26
LM0	86.55	4.46	42.83	25.05	37.67	50
LL2	31.06	4.46	53.69	27.03	19.75	27
LL1	49.16	4.46	53.69	25.16	28.66	14
LL0	80.66	4.46	53.69	26.78	44.17	65

จากตารางที่ 5.7 ค่ามอดูลัสที่ได้จากการทดลองของวัสดุผสมเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามอดูลัสที่ได้จากการคำนวณนั้นพบว่า มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของค่ามอดูลัสนั้นอาจเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสม



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและขนาดของเส้นใย

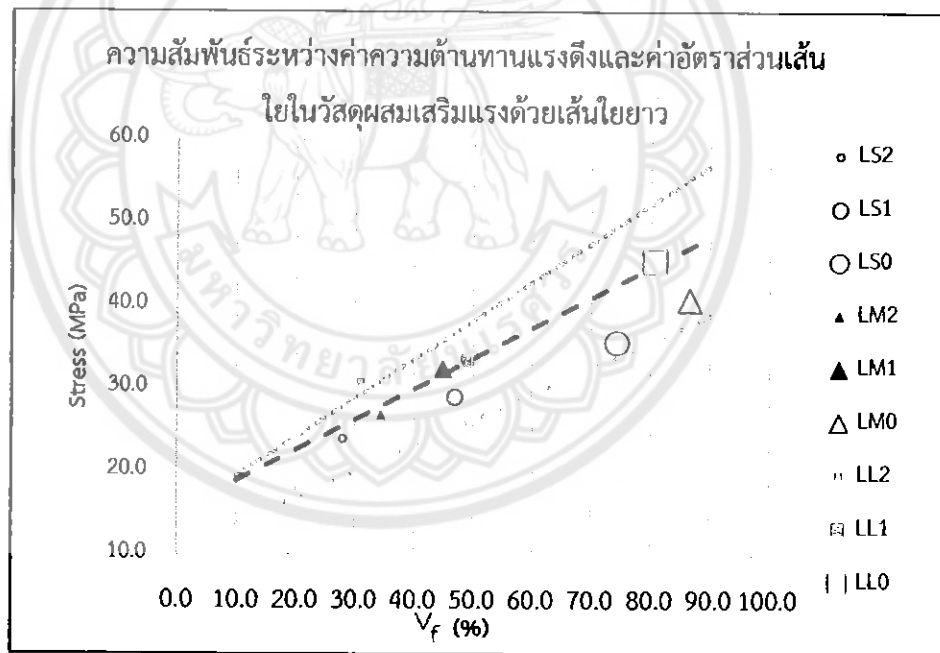
5.4.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกับ σ_u และ E ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว

จากรูปที่ 5.12 พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต (σ_u) โดยค่า σ_u ของวัสดุผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมากขึ้นดังรูปที่ 5.12 เช่น วัสดุเสริมแรงแบบ LS0 LM0 LL0 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49 mm 0.59 mm และ 0.76 mm ตามลำดับ พบว่าค่า σ_u มีค่า 30.82 MPa 33.31 MPa และ 45.43 MPa ตามลำดับ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย มีผลกระทบต่อค่า E ค่อนข้างน้อย โดยค่า E เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนขนาดของเส้นใย ซึ่งค่า E จะมีค่าอยู่ในช่วง 20 – 30 MPa ตามรูปที่ 5.13

5.4.4 ความสัมพันธ์ของค่า V_f ที่มีผลต่อค่า E และค่า σ_U ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย

ยาว

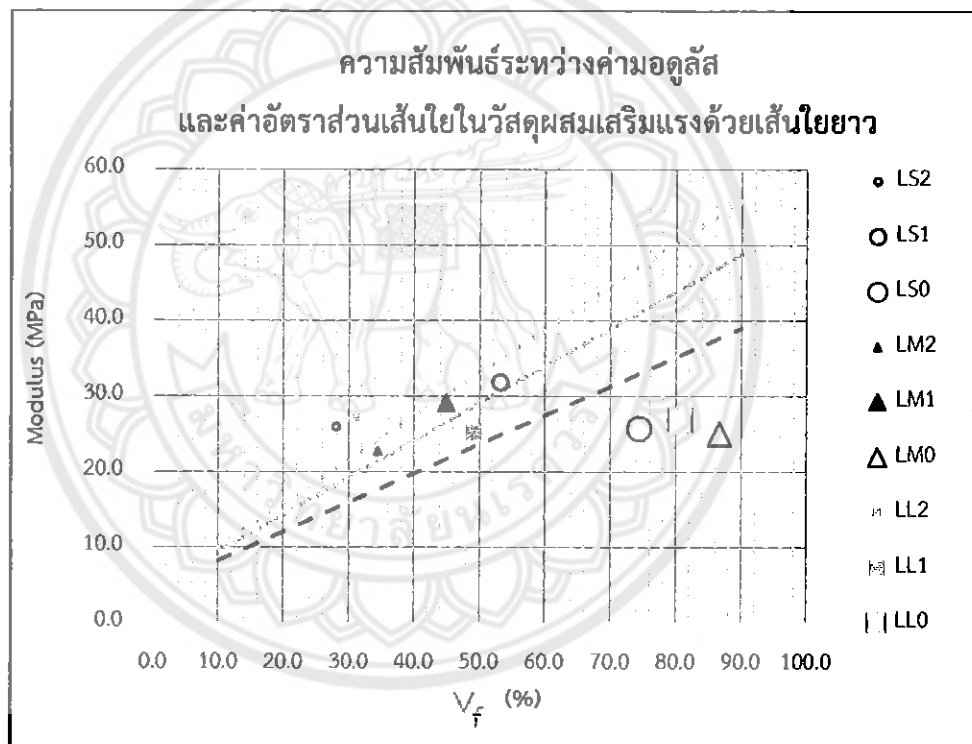
ในรูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนเส้นใยยาวในวัสดุผสมโดยเส้นแนวโน้มที่ปรากฏในรูปกราฟนั้น สร้างจากสมการที่ 2.8 โดยกำหนดให้ค่า V_f อยู่ในช่วง 10% - 90% แล้วแทนค่าลงในสมการ จากกราฟจะสังเกตได้ว่า เมื่อค่า V_f เพิ่มขึ้นค่า σ_U ที่ได้จากคำนวณนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า V_f และเมื่อนำค่าที่ได้จากคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าการทดลองมีความคลาดเคลื่อน ทำให้แนวโน้มของ ค่า σ_U เมื่อเทียบกับค่า V_f ไม่เส้นเส้นตรง แต่ค่าที่ได้จากการทดลองยังคงมีแนวโน้มเป็นไปตามผลการคำนวณ คือเมื่อค่า V_f เพิ่มขึ้น ค่า σ_U มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนเส้นใยยาวในวัสดุผสม

Fiber S - - - - Fiber M Fiber L

ในรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและค่าอัตราส่วนเส้นใยยาวในวัสดุผสม โดยเส้นแนวโน้มที่ปรากฏในรูปกราฟนั้น สร้างจากสมการที่ 2.6 โดยกำหนดให้ค่า V_f อยู่ในช่วง 10% - 90% แล้วแทนค่าลงในสมการ จากกราฟจะสังเกตได้ว่า เมื่อค่า V_f เพิ่มขึ้นค่า E ที่ได้จากคำนวณนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า V_f และเมื่อนำค่าที่ได้จากคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าการทดลองมีความคลาดเคลื่อน ทำให้แนวโน้มของ ค่า E เมื่อเปรียบเทียบกับค่า V_f ไม่เป็นไปตามแนวโน้มของการคาดการณ์ด้วยสมการ แต่ค่าที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า V_f เพิ่มขึ้น ค่า E ของวัสดุผสมนั้นมีแนวโน้มไม่คงที่ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 25-30 MPa



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและค่าอัตราส่วนเส้นใยยาวในวัสดุผสม

Fiber S
 Fiber M
 Fiber L

5.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นและเส้นใยชนิดยาว

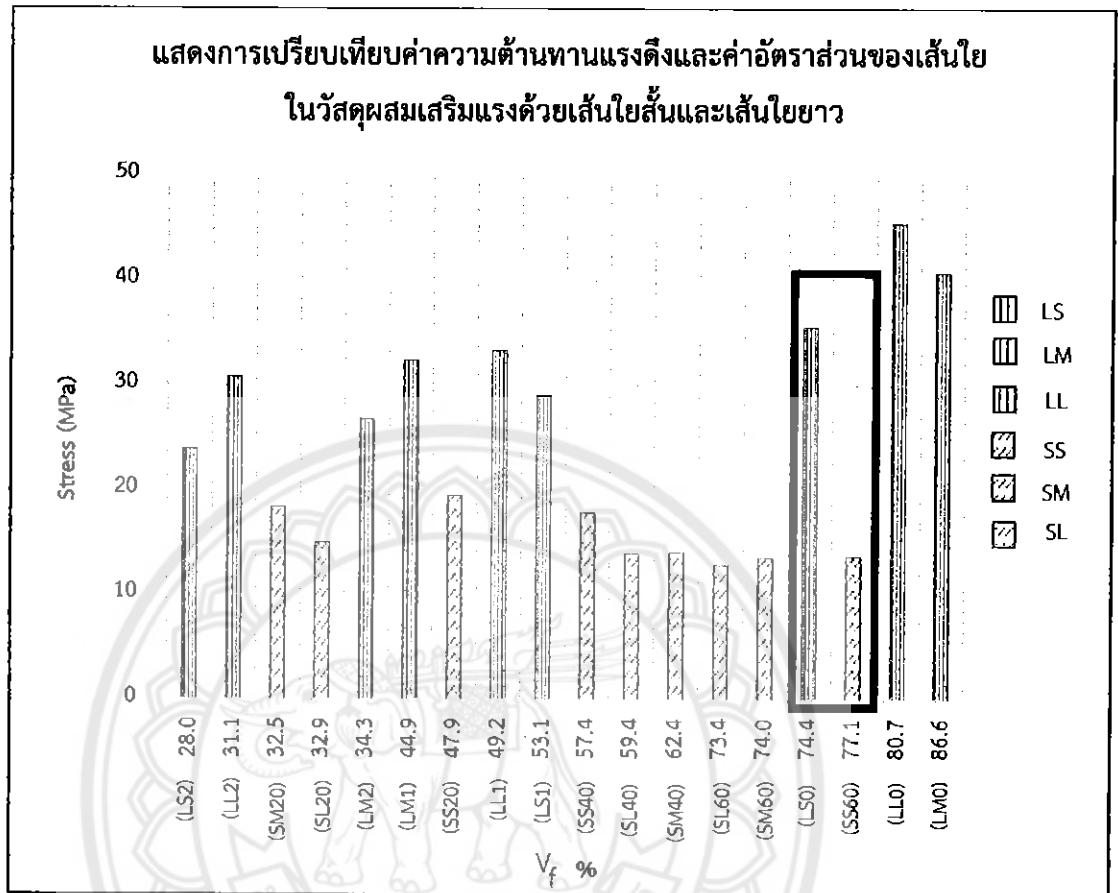
จากตารางที่ 5.8 สังเกตได้ว่าวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นสามารถต้านทานแรงดึงได้น้อยกว่าวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว และค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นมีค่าน้อยกว่าค่ามอดูลัสของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาวมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงตามแนวขนานกับการเรียงตัวของเส้นใยและมีความยืดหยุ่นดีกว่าวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น โดยวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือวัสดุผสมแบบ SS20 มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 19.48 MPa และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นที่มีค่ามอดูลัสสูงสุดคือวัสดุผสมแบบ SM20 มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 30.79 MPa และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาวที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือวัสดุผสมแบบ LLO มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 45.43 MPa และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นที่มีค่ามอดูลัสมากที่สุดคือวัสดุผสมแบบ LS1 มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 31.86 MPa

เมื่อนำวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นและเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวมาเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสมที่มีค่าใกล้เคียงกันคือ วัสดุผสมแบบ SS60 ที่มีค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม (V_f) ที่ 77.09% และวัสดุผสมแบบ LS0 ที่มีค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม (V_f) ที่ 74.36% ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 5.8 ตามสำคัญ พบว่าวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวมีความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสสูงกว่าวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น

ตารางที่ 5.8 ค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสม ความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสของวัสดุผสม เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้นและเส้นใยชนิดยาว

Model	เส้นใยชนิดสั้น			Model	เส้นใยชนิดยาว		
	V_f (%)	σ_u (MPa)	E (MPa)		V_f (%)	σ_u (MPa)	E (MPa)
SS20	47.89	19.48	17.98	LS2	28.00	23.92	25.96
SS40	57.40	17.86	19.64	LS1	53.09	29.02	31.86
SS60	77.09	13.64	22.63	LS0	74.36	35.61	25.74
SM20	32.50	18.39	34.61	LM2	34.33	26.77	22.77
SM40	62.42	14.08	30.17	LM1	44.87	32.40	29.15
SM60	74.00	13.54	27.75	LM0	86.55	40.73	25.05
SL20	32.93	14.97	29.76	LL2	31.06	30.82	27.03
SL40	59.44	13.98	26.00	LL1	49.16	33.31	25.16
SL60	73.44	12.85	27.60	LL0	80.66	45.43	26.78

จากรูปที่ 5.16 จะสังเกตได้ว่าเมื่อพิจารณาจากวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นและเส้นใยยาวที่มีค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสมใกล้เคียงกัน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว มีค่ามากกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น



รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงและค่าอัตราส่วนของเส้นใยในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การทดสอบจะขึ้นรูปโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากมะพร้าวใช้วิธีการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D3039 ได้เริ่มเตรียมอุปกรณ์ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต โดยเนื้อพื้นที่ใช้คือ โพลีเอสเตอร์เรซิน จากการวิเคราะห์หาค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยชนิดสั้นด้วยรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์พบว่า เส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 1.37 mm เมื่อขึ้นรูปและเขียนรหัสชิ้นงานเสร็จแล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายรูปแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ และทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

จากการวิเคราะห์โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวโดยใช้โปรแกรม ImageJ พบว่าค่า V_f ของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากกระบวนการและวิธีการขึ้นรูปและจุดที่ถ่ายภาพเพื่อมาวิเคราะห์ผล เช่น วัสดุผสม SS20 มีความคลาดเคลื่อน 139.45% และความคลาดเคลื่อนของค่า V_f ในวัสดุผสมอื่นๆแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งค่า V_f ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.15 โดยสำหรับวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น ค่าความต้านทานแรงดึงจะสูงขึ้นถึงค่า V_f เท่ากับ 47.89% และจะลดลงเมื่อมีค่า V_f สูงขึ้น สำหรับวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว เมื่อค่า V_f เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย รวมถึงค่ามอดูลัส เมื่อวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นมีค่า V_f อยู่ในช่วง 32.50-47.89% มีแนวโน้มที่ค่า E จะลดลง วัสดุผสมที่มีค่า V_f อยู่ในช่วง 57.40-62.42% มีแนวโน้มที่ค่า E จะเพิ่มขึ้น และวัสดุผสมที่มีค่า V_f อยู่ในช่วง 73.44-77.09% จะมีแนวโน้มที่ค่า E จะลดลง สำหรับวัสดุผสมแบบเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว เมื่อค่า V_f เพิ่มขึ้น ค่า E ของวัสดุผสมนั้นมีแนวโน้มไม่คงที่ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 25-30 MPa

จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.12 โดยสำหรับวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้วัสดุผสมมีความต้านทานที่น้อยลง สำหรับวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงมากขึ้น และค่า E สำหรับวัสดุผสมเสริมแรง

ด้วยเส้นใยสั้น ค่า E จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.59 mm และค่า E จะลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมากกว่า 0.59-0.76 mm ดังรูปที่ 5.8 สำหรับวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาวส่งผลกระทบต่อค่า E ค่อนข้างน้อย โดยค่า E เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนขนาดของเส้นใย ซึ่งค่า E จะมีค่าอยู่ในช่วง 20 – 30 MPa ตามรูปที่ 5.13

โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น มีความต้านทานแรงดึงที่น้อยกว่าโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรง อาจเนื่องมาจากเกิดจากฟองอากาศที่มีจำนวนมากในชิ้นงาน รวมถึงการกระจายตัวของเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นไม่สม่ำเสมอในชิ้นงานทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าโพลีเอสเตอร์เรซินที่ไม่มีการเสริมแรงดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 5.1 โดยโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นมีความต้านทานแรงดึงมากที่สุดคือ วัสดุผสมแบบ SS20 ($V_f = 47.89\%$) มีความต้านทานแรงดึง 19.48 MPa

ค่ามอดูลัสแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้น บ่งบอกถึงความสามารถในการยึดตัวของวัสดุผสม โดยค่าจากการทดลองเป็นไปตามผลการวิเคราะห์คือค่าควร จะอยู่ในช่วง ในช่วง 4.46 MPa – 61.73 MPa โดยโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดสั้นที่มีค่ามอดูลัสแรงดึงมากที่สุดคือ วัสดุผสมแบบ SM20 ($V_f = 32.50\%$) มีค่ามอดูลัสแรงดึงเท่ากับ 34.61 MPa

โพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาว มีความต้านทานแรงดึงเป็นไปตามรูปที่ 2.6 และรูปที่ 5.1a คือ ความต้านทานแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวอยู่ในช่วง 23.11 MPa - 61.57 MPa โดยโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวที่มีความต้านทานแรงดึงมากที่สุดคือ วัสดุผสมแบบ LLO ($V_f = 80.66\%$) มีความต้านทานแรงดึง 45.43 MPa

ค่ามอดูลัสแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ โดยโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวชนิดยาวที่มีค่ามอดูลัสแรงดึงมากที่สุด คือ วัสดุผสมแบบ LS1 ($V_f = 53.09\%$) มีค่ามอดูลัสแรงดึงเท่ากับ 31.86 MPa

6.2 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

วัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการเสริมแรงเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าจะได้รับการพิจารณา แต่การเตรียมวัสดุธรรมชาติให้ได้คุณสมบัติที่คงที่นั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวที่ต้องควบคุม จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ไม่ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง

ในการทำการทดลองเกิดข้อผิดพลาดขึ้นหลายประการ ตั้งแต่การควบคุมคุณภาพของเส้นใยที่นำมาใช้ในการทดลอง เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีตัวแปรหลายตัวที่ต้องควบคุม แต่เส้นใยที่ใช้ในการ

ทำการทดลองไม่สามารถควบคุมตัวแปรได้ทั้งหมด เช่น อายุของมะพร้าว สายพันธุ์ ระยะเวลาของการใช้งานเส้นใย การตวงเส้นใยที่ใช้ในการทดลอง และข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นยังประกอบไปด้วยสภาพแวดล้อมในการขึ้นรูปควรทำการขึ้นรูปในที่ที่มีอุณหภูมิคงที่ อีกทั้งควรวางแผนการขึ้นรูปให้ดี เพราะโพลีเอสเทอร์เรซินที่ผสมหลายๆครั้งจะทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และวิธีการขึ้นรูปที่มีการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอ การเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน รวมถึงจุดที่ใช้ถ่ายภาพของวัสดุผสมเพื่อนำมาวิเคราะห์หาอัตราส่วนของเส้นใยในชิ้นงาน จึงทำให้ผลการวิเคราะห์บางวัสดุผสมไม่เป็นที่ไปตามทฤษฎี

วัสดุผสมที่ได้ทำการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในงานที่มีการรับแรงดึงไม่เกิน 45.43 MPa และเป็นแนวทางในการศึกษาโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากธรรมชาติ

6.3 ผลของฟองอากาศต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสม

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเป็นข้อผิดพลาดอย่างหนึ่ง que แสดงให้เห็นว่า ฟองอากาศมีผลต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสม โดยคำนวณตามสมการที่ 2.11 โดย V'_m ค่าอัตราส่วนของโพลีเอสเทอร์เรซินที่ไม่มีฟองอากาศในวัสดุผสม ยกตัวอย่างวัสดุผสมแบบ SS20 ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ : ค่ามอดูลัสของวัสดุผสมแบบ SS20

SS20	
K	0.53
E_f	61.73
E_m	4.46
V_f	0.48
V'_m	0.43

$$E_c = (0.53 \times 61.73 \times 0.48) + (4.46 \times 0.43)$$

เพราะฉะนั้น $E_c = 17.56 \text{ MPa}$

จะเห็นได้ว่าค่ามอดูลัสของวัสดุผสมแบบ SS20 ที่ไม่คิดผลของฟองอากาศในชิ้นงานมีค่ามากกว่าค่ามอดูลัสของวัสดุผสมแบบ SS20 ที่คิดผลของฟองอากาศในชิ้นงาน จึงสรุปได้ว่าฟองอากาศในชิ้นงานมีผลต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสม

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 คัดเลือกเส้นใยที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เช่น อายุ สายพันธุ์ ฯ

6.4.2 โพลีเอสเทอร์เรซินเป็นสารเคมีควรมีอุปกรณ์ป้องกันระหว่างใช้งาน

6.4.3 การขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์เรซินควรขึ้นรูปในสภาพแวดล้อมที่คงที่ เช่น ในห้องทดลองเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการทำการทดลอง

6.4.4 รั้วระวางอย่าให้เกิดฟองอากาศในชิ้นงาน

6.4.5 วางแผนการขึ้นรูป เพราะการผสมโพลีเอสเตอร์เรซินหลายครั้งจะทำให้คุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์เรซินแตกต่างกัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] International, A. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. United States: 105-116.
- [2] ศรุต ศรีสันติสุขและคณะ. (2555). การเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟ โยแก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13
- [3] จรรยาวรรณ จรรยาธรรมและประทับใจ ลึกษา. (2555). การพัฒนาเส้นใยของต้นจากเพื่อใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์. วารสารวิชาการศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. ปีที่3, 94-104.
- [4] ผศ.ดร.สุภาสิณี ลิ้มปานภาพ(ผู้บรรยาย). คอมโพสิต. (191-211) คณาจารย์ ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร .
- [5] ประโยชน์ที่ได้รับจากมะพร้าว. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2556, จาก http://www.angelfire.com/hero/t_coconut/page2x3.htm
- [6] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2555). มะพร้าว. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555. (402), 33-35.
- [7] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ . สมบัติเชิงกลของวัสดุ. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2556 , จาก <http://www.mtec.or.th/laboratory/mech/index.php/knowledge/31-2009-04-20-04-12-48>
- [8] Mechanical Properties of Materials. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2556 , จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/metal/1/Mechanical%20Properties.htm>
- [9] โปรแกรม ImageJ และวิธีการใช้งาน, สืบค้นเมื่อ 3 พฤษภาคม 2557 , จาก <https://sites.google.com/site/thaiimagej/>

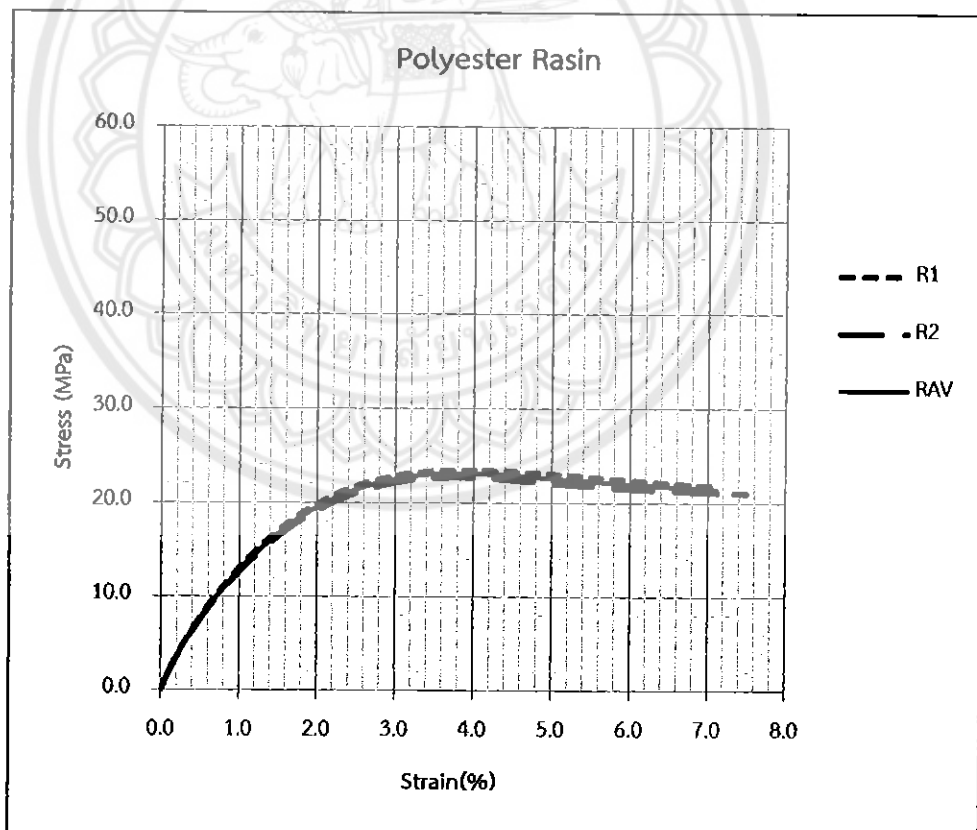


การทดสอบ : Polyester Rasin

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เรซิน

ผลการทดลอง :

Model	Rasin1	Rasin2	Average
σ_U	23.47 MPa	22.74 MPa	23.11 MPa
Elongation	3.95 %	3.79 %	3.87 %
σ_F	21.07 MPa	21.00 MPa	21.03 MPa
Elongation	7.12 %	7.50 %	7.31 %
E	4.68 MPa	4.24 MPa	4.46 MPa

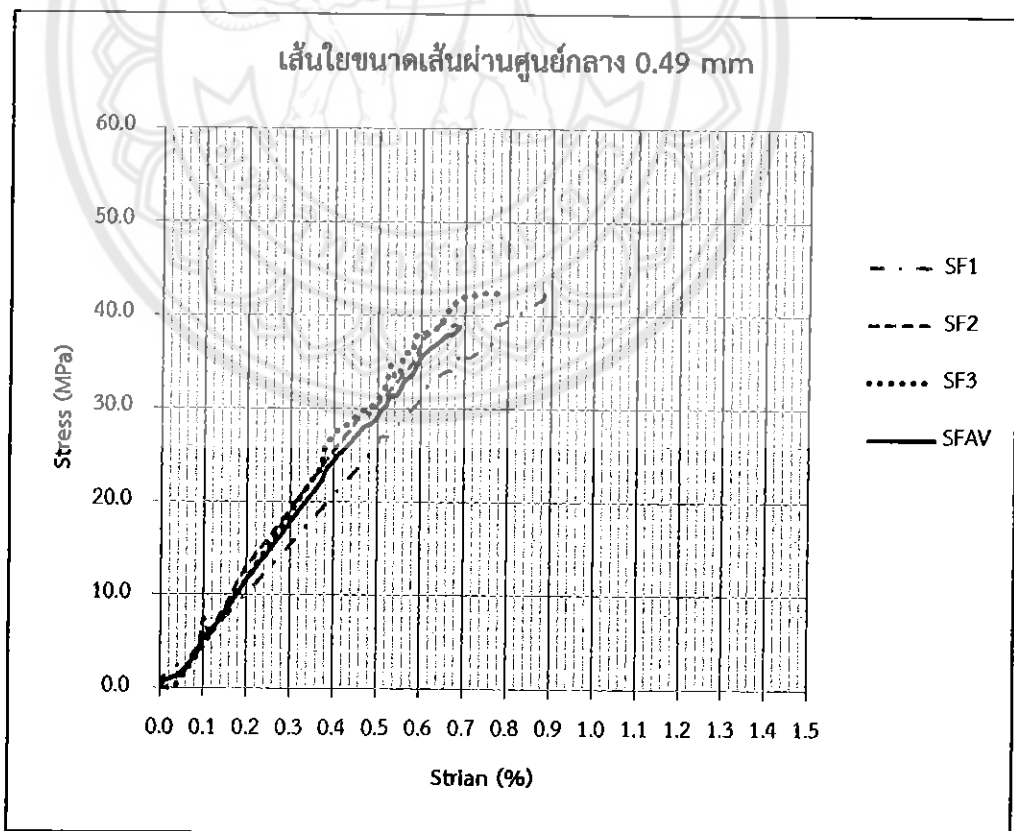


การทดสอบ : เส้นใยมะพร้าวขนาด S

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเส้นใยมะพร้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49 mm

ผลการทดลอง :

Model	SFiber1	SFiber2	SFiber3	Average
σ_U	43.71 MPa	39.16 MPa	43.11 MPa	41.99 MPa
Elongation	0.90 %	0.65 %	0.77 %	0.77 %
σ_F	40.42 MPa	38.30 MPa	40.64 MPa	39.79 MPa
Elongation	0.90 %	0.69 %	0.78 %	0.79 %
E	54.52 MPa	66.70 MPa	63.98 MPa	61.73 MPa

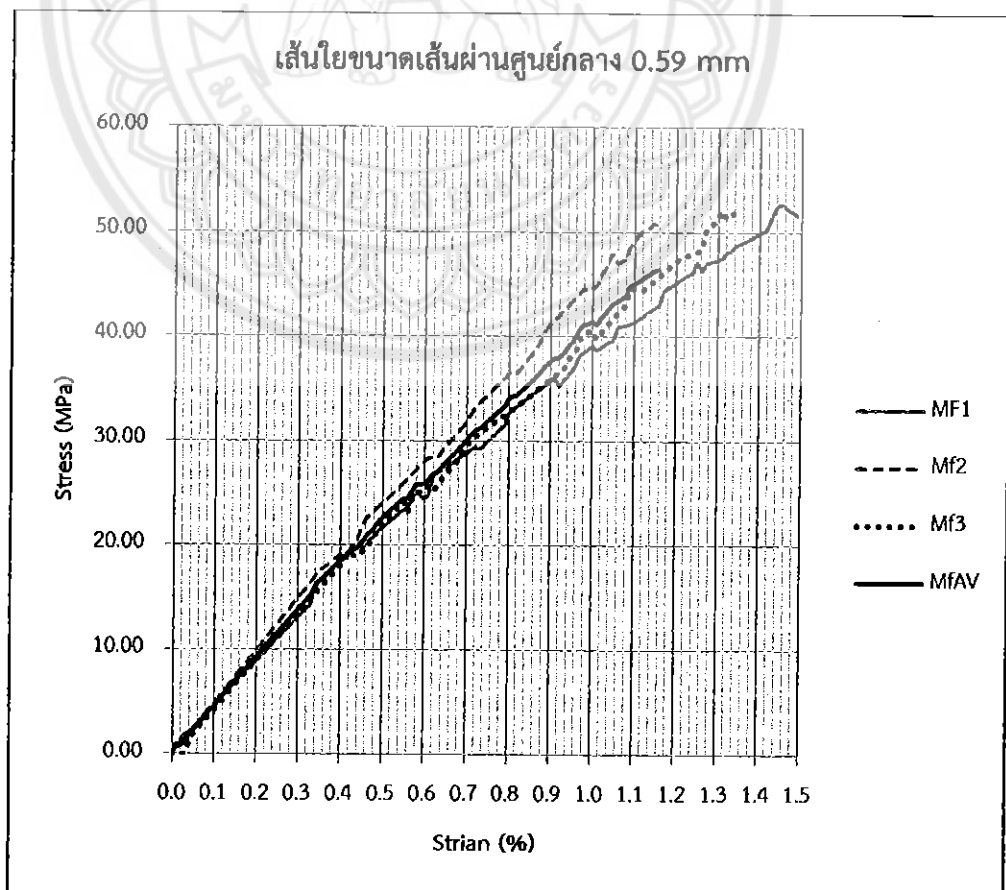


การทดสอบ : เส้นใยมะพร้าวขนาด M

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเส้นใยมะพร้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.59 mm

ผลการทดลอง :

Model	MFiber1	MFiber2	MFiber3	Average
σ_U	52.82 MPa	50.90 MPa	52.38 MPa	52.03 MPa
Elongation	1.45 %	1.15 %	1.31 %	1.30 %
σ_F	51.70 MPa	50.22 MPa	51.94 MPa	51.28 MPa
Elongation	1.49 %	1.16%	1.34 %	1.33 %
E	37.96 MPa	48.27 MPa	42.33 MPa	42.85 MPa

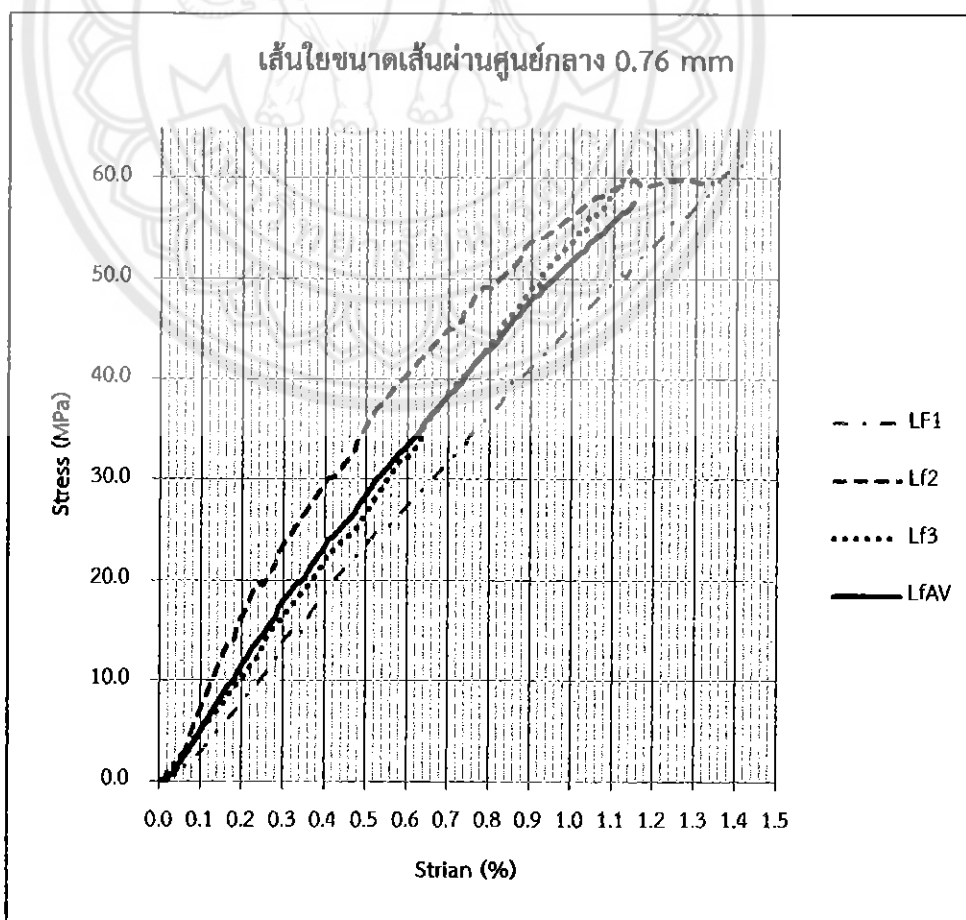


การทดสอบ : เส้นใยมะพร้าวขนาด L

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเส้นใยมะพร้าวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.78 mm

ผลการทดลอง :

Model	LFiber1	LFiber2	LFiber 3	Average
σ_U Elongation	62.92 MPa 1.44 %	59.86 MPa 1.15 %	61.93 MPa 1.15 %	61.57 MPa 1.25 %
σ_F Elongation	62.92 MPa 1.44 %	59.55 MPa 1.34 %	61.93 MPa 1.15%	61.47 MPa 1.31 %
E	46.81 MPa	55.46 MPa	58.79 MPa	53.69MPa

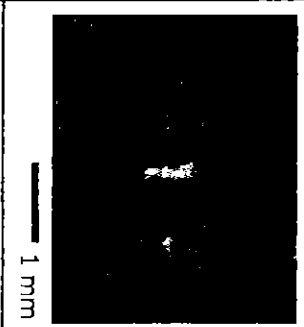
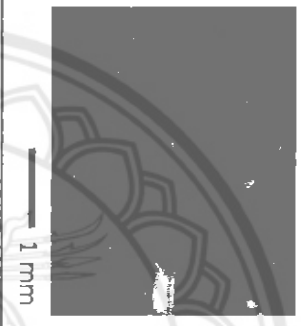






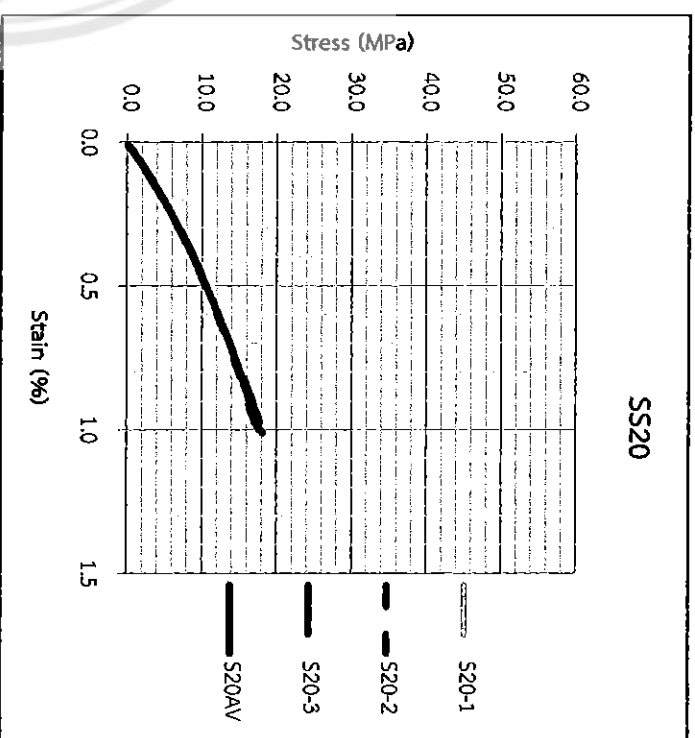
การทดสอบ : SS20

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงขึ้นงานเตรียมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.49 mm A=48.89%

ผลการทดลอง :

	SS20-1	SS20-2	SS20-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_u Elongation	19.30 MPa 1.15 %	20.68 MPa 1.33 %	18.46 MPa 1.14 %
σ_f Elongation	19.29 MPa 1.15 %	19.92 MPa 1.33 %	19.83 MPa 1.14 %
	$V_f = 47.33\%$ $V_m = 52.67\%$	$V_f = 49.22\%$ $V_m = 50.78\%$	$V_f = 47.13\%$ $V_m = 52.87\%$

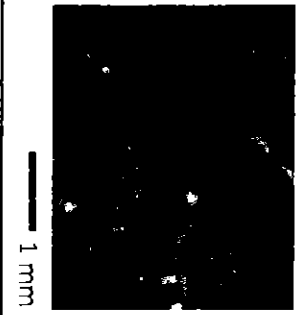
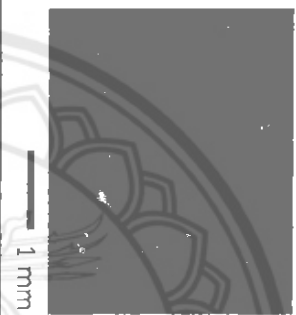
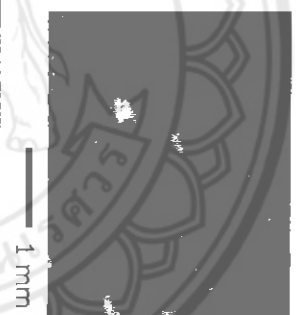

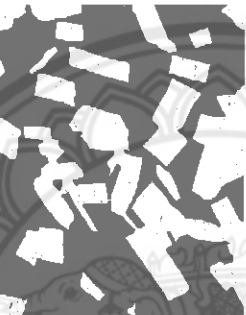



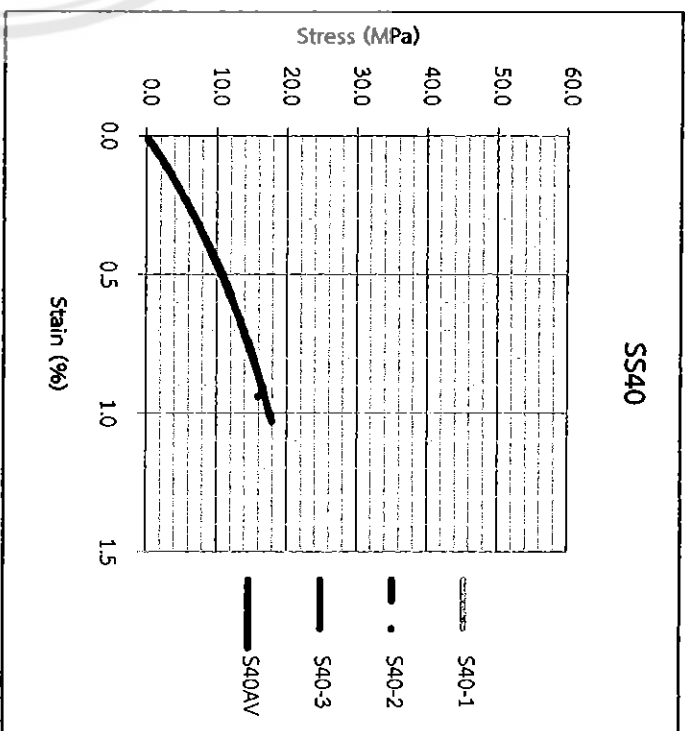
การทดสอบ : SS40

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงขึ้นงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.49 mm A=57.40%

ผลการทดลอง :

	SS40-1	SS40-2	SS40-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U	18.00 MPa	17.99 MPa	17.59 MPa
Elongation	1.02 %	1.03 %	1.01 %
σ_F	17.11 MPa	13.39 MPa	17.08 MPa
Elongation	1.02 %	1.03 %	1.01 %
	$V_f = 59.56\%$ $V_m = 40.44\%$	$V_f = 60.43\%$ $V_m = 39.57\%$	$V_f = 52.21\%$ $V_m = 47.79\%$



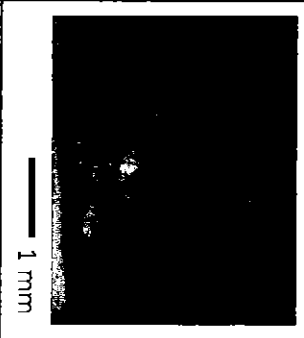
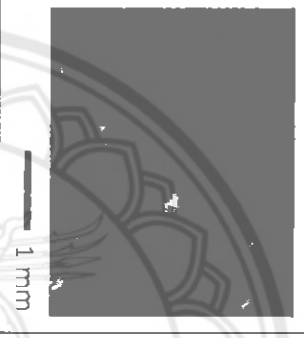
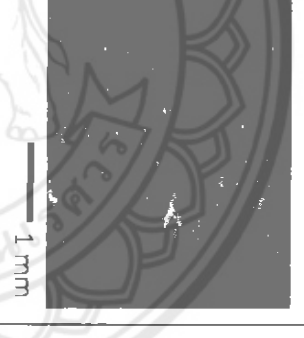



	ค่าเฉลี่ย
σ_U	17.86 MPa
Elongation	1.02 %
σ_F	15.86 MPa
Elongation	1.02 %

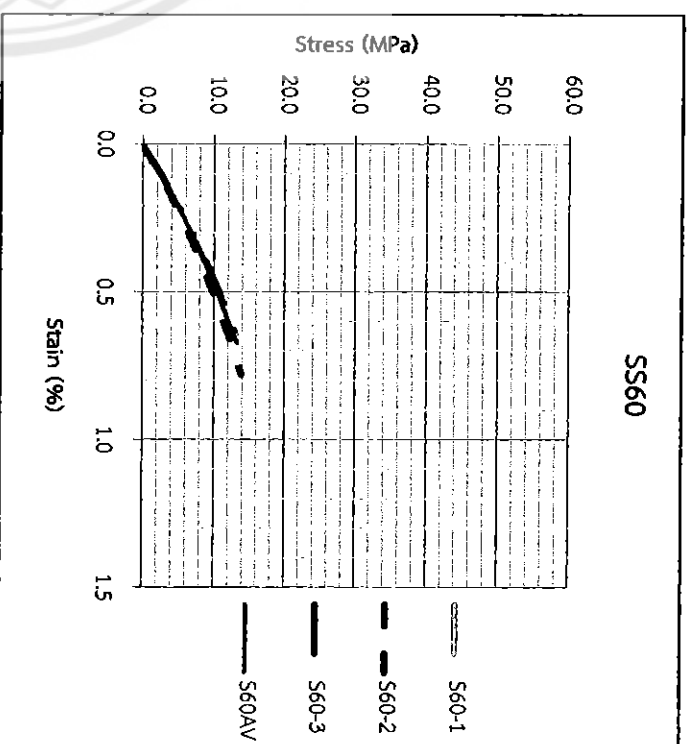
การทดสอบ : SS60

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.49 mm A=77.09%

ผลการทดลอง :

	SS60-1	SS60-2	SS60-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U Elongation	13.47 MPa 0.67 %	13.96 MPa 0.78 %	13.47 MPa 0.67 %
σ_F Elongation	13.47 MPa 0.67 %	10.44 MPa 0.78 %	10.53 MPa 0.67 %
	$V_f = 78.69\%$ $V_m = 21.31\%$	$V_f = 76.70\%$ $V_m = 23.30\%$	$V_f = 75.87\%$ $V_m = 24.13\%$



ค่าเฉลี่ย


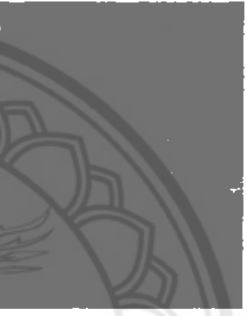




σ_U	13.64 MPa
Elongation	0.71 %
σ_F	11.48 MPa
Elongation	0.71 %

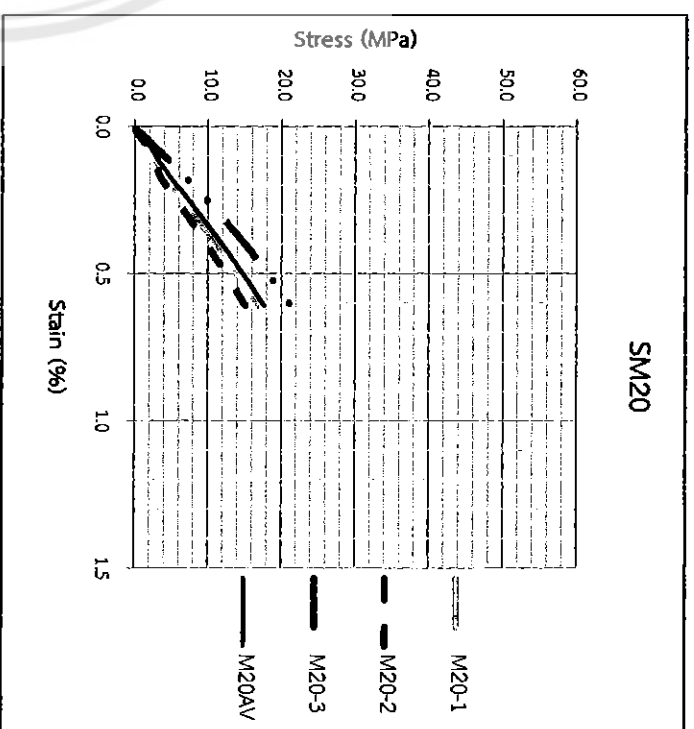
การทดสอบ : SM20

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.59 mm A=33.50%

ผลการทดลอง :

	SM20-1	SM20-2	SM20-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_u Elongation	16.80 MPa 0.61 %	16.58 MPa 0.67 %	21.79 MPa 0.62 %
σ_f Elongation	15.38 MPa 0.61 %	13.00 MPa 0.67 %	21.53 MPa 0.62 %
	$V_f = 30.28\%$ $V_m = 69.72\%$	$V_f = 30.74\%$ $V_m = 69.26\%$	$V_f = 36.49\%$ $V_m = 63.51\%$

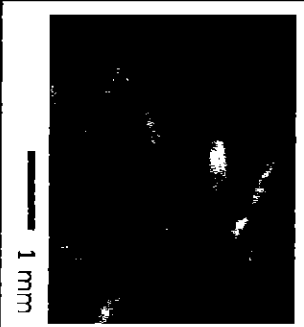
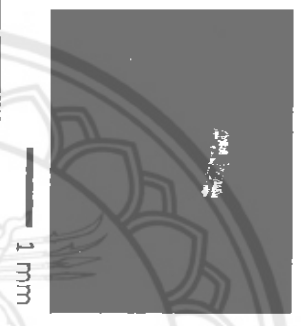






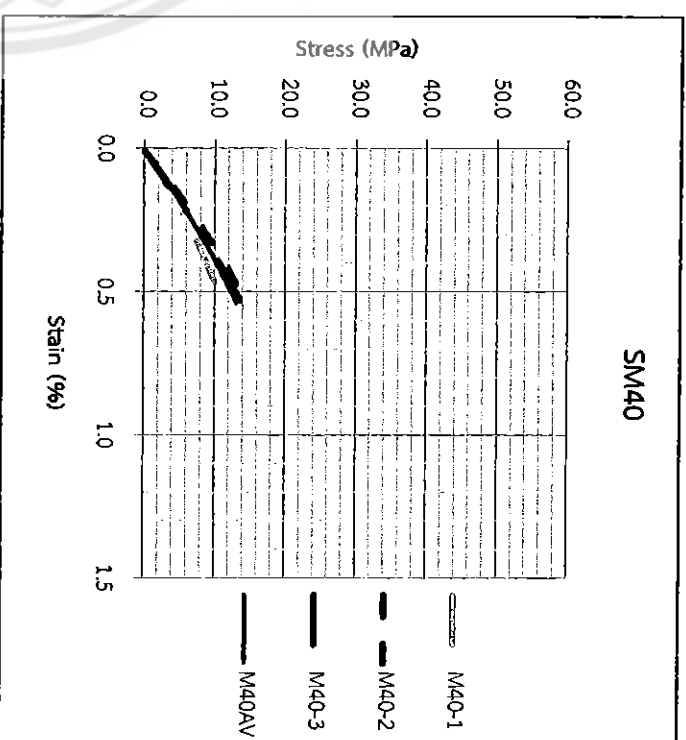
การทดสอบ : SM40

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.59 mm A=62.42%

ผลการทดลอง :

	SM40-1	SM40-2	SM40-3
รูปถ่าย			
BSW			
σ_u Elongation	12.28 MPa 0.56 %	14.61 MPa 0.54 %	15.35 MPa 0.61 %
σ_f Elongation	10.79 MPa 0.56 %	12.83 MPa 0.54 %	14.21 MPa 0.61 %
	$V_f = 56.15\%$ $V_m = 43.85\%$	$V_f = 67.54\%$ $V_m = 32.46\%$	$V_f = 63.58\%$ $V_m = 36.42\%$



ค่าเฉลี่ย

14.08 MPa

0.57 %

12.61 MPa

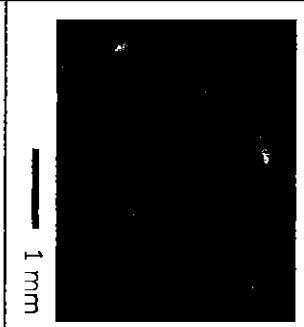
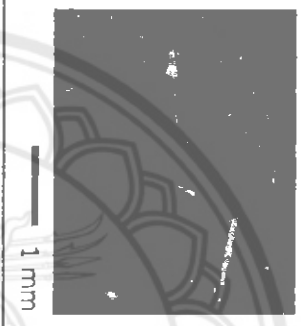
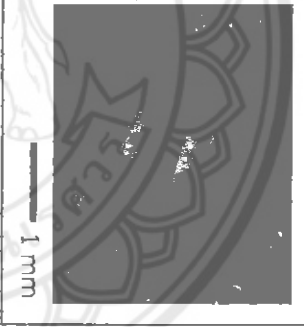



0.57 %

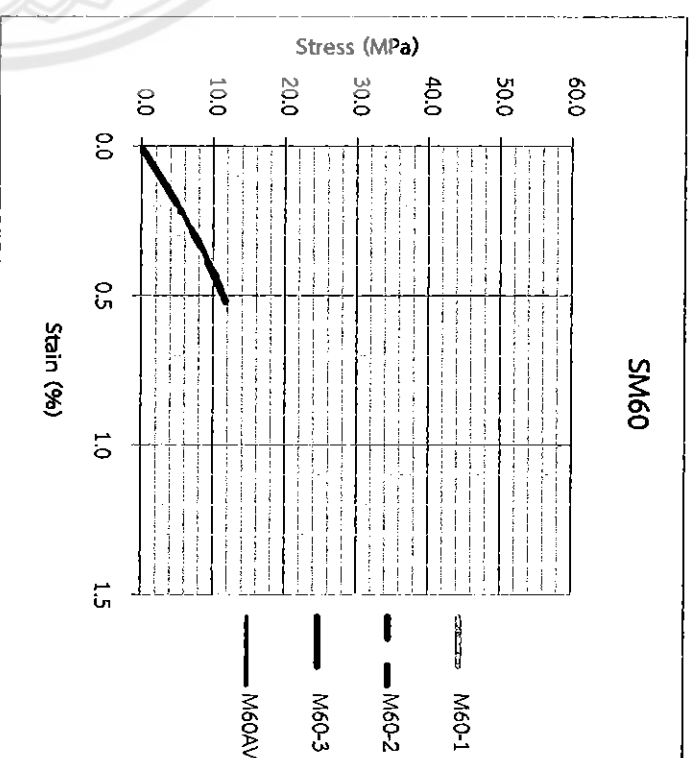
การทดสอบ : SM60

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.59 mm A=74.40%

ผลการทดลอง :

	SM60-1	SM60-2	SM60-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U Elongation	12.57 MPa 0.58 %	15.35 MPa 0.67 %	12.71 MPa 0.52 %
σ_f Elongation	12.48 MPa 0.58 %	14.98 MPa 0.67 %	11.68 MPa 0.52 %



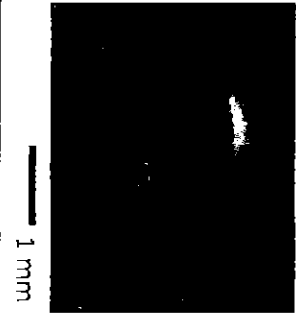
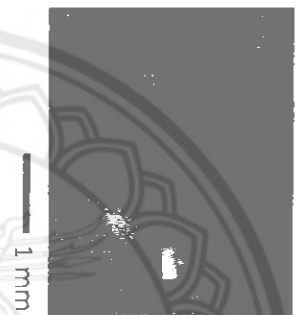




σ_U Elongation	13.54 MPa 0.59 %
σ_f Elongation	13.05 MPa 0.59 %

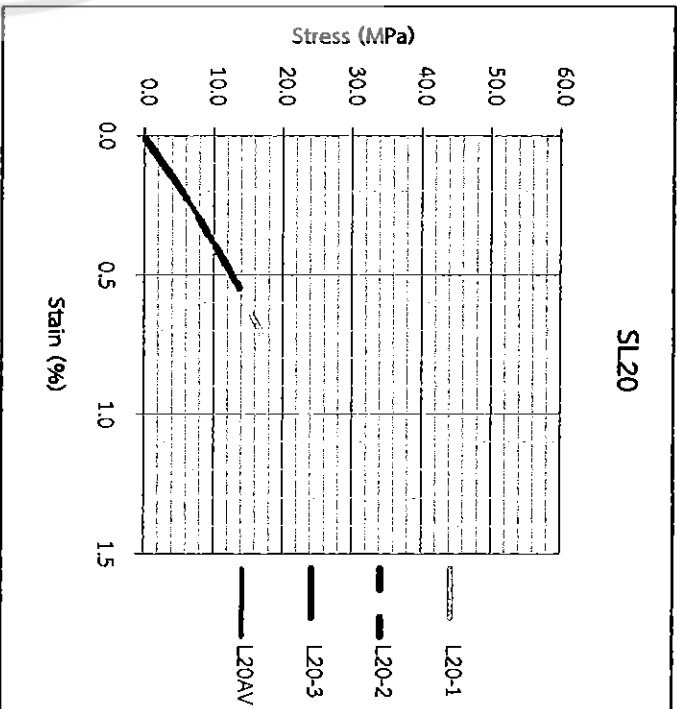
การทดสอบ : SL20

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.76 mm A=32.93%

ผลการทดลอง :

	SL20-1	SL20-2	SL20-3
รูปถ่าย			
B&W			
$V_f = 36.52\%$ $V_m = 63.48\%$	$V_f = 27.43\%$ $V_m = 72.57\%$	$V_f = 34.85\%$ $V_m = 65.16\%$	
σ_U	16.97 MPa	13.70 MPa	14.25 MPa
Elongation	0.70 %	0.54 %	0.58 %
σ_F	16.94 MPa	13.55 MPa	13.26 MPa
Elongation	0.70 %	0.54 %	0.58 %



ค่าเฉลี่ย

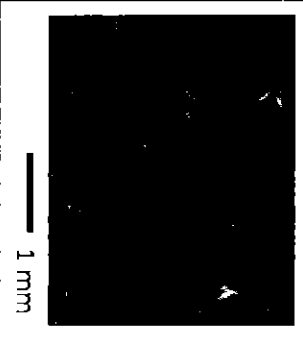


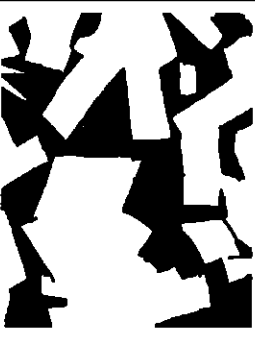


σ_U	14.97 MPa
Elongation	0.61 %
σ_F	14.59 MPa
Elongation	0.61 %

การทดสอบ : SL40

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงขึ้นงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิด

เส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.76 mm A=59.44%

ผลการทดลอง :

	SL40-1	SL40-2	SL40-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U Elongation	14.25 MPa 0.63 %	14.64 MPa 0.63 %	13.04 MPa 0.66 %
σ_F Elongation	12.41 MPa 0.63 %	13.47 MPa 0.629 %	12.47 MPa 0.66 %

$V_f = 61.02\%$ $V_m = 44.12\%$

$V_f = 61.069\%$ $V_m = 38.949\%$

$V_f = 56.25\%$ $V_m = 43.75\%$

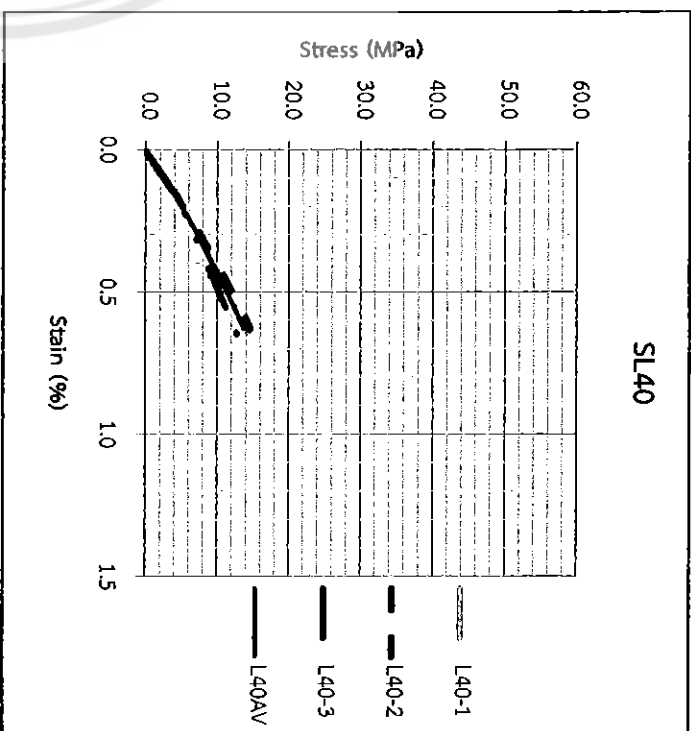
ค่าเฉลี่ย

13.98 MPa

0.64 %

12.79 MPa

0.64 %

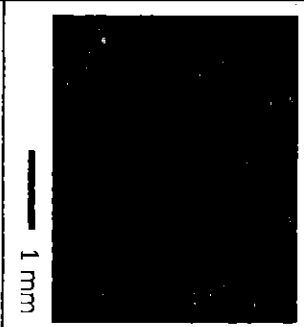







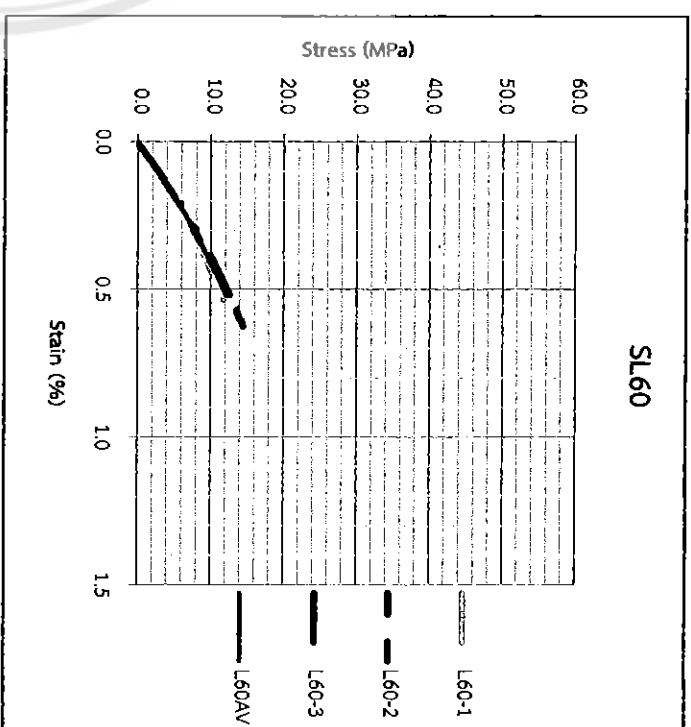
การทดสอบ : SL60

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดสั้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.76 mm A=73.44%

ผลการทดลอง :

	SL60-1	SL60-2	SL60-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_u Elongation	12.40 MPa 0.52 %	12.23 MPa 0.54 %	13.93 MPa 0.65 %
σ_f Elongation	12.09 MPa 0.52 %	10.85 MPa 0.54 %	10.15 MPa 0.65 %
	$V_f = 77.12\%$ $V_m = 22.88\%$	$V_f = 70.18\%$ $V_m = 29.82\%$	$V_f = 73.04\%$ $V_m = 26.96\%$



ค่าเฉลี่ย

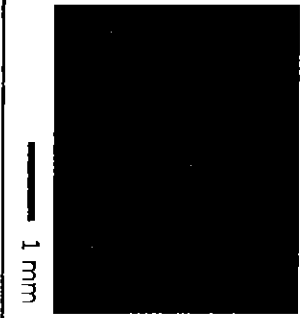


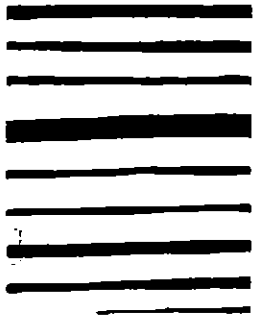
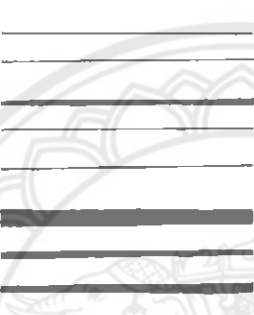

σ_u	12.85 MPa
Elongation	0.57 %
σ_f	11.03 MPa
Elongation	0.57 %

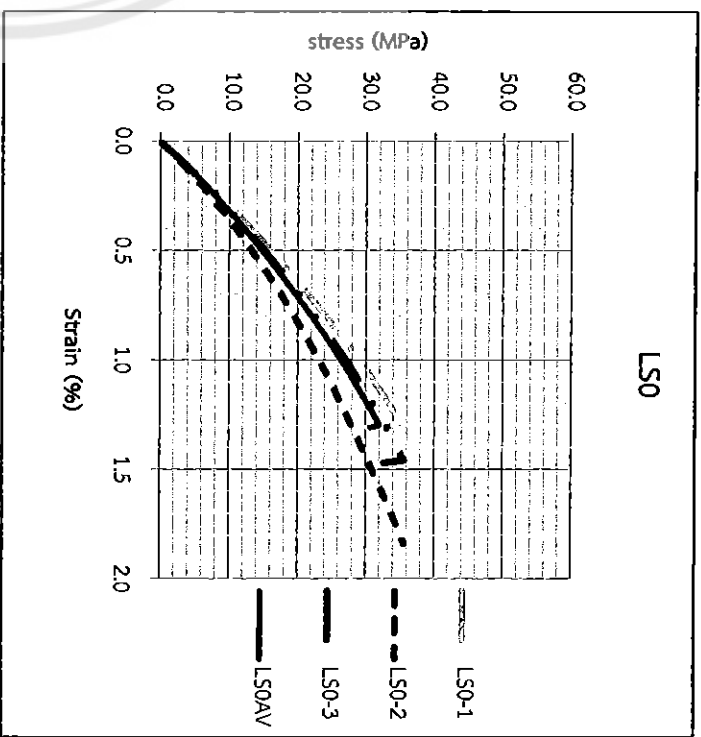
การทดสอบ : LSO

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.49 mm A=74.36%

ผลการทดลอง :

	LSO-1	LSO-2	LSO-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U Elongation	35.50 MPa 1.31 %	35.59 MPa 1.84 %	35.74 MPa 1.47 %
σ_F Elongation	31.00 MPa 1.31 %	35.59 MPa 1.84 %	32.68 MPa 1.47 %



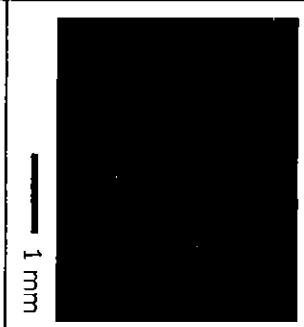


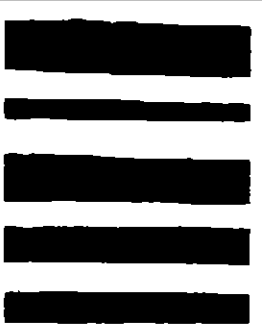


ค่าเฉลี่ย	
σ_U	35.61 MPa
Elongation	1.54 %
σ_F	33.09 MPa
Elongation	1.54 %

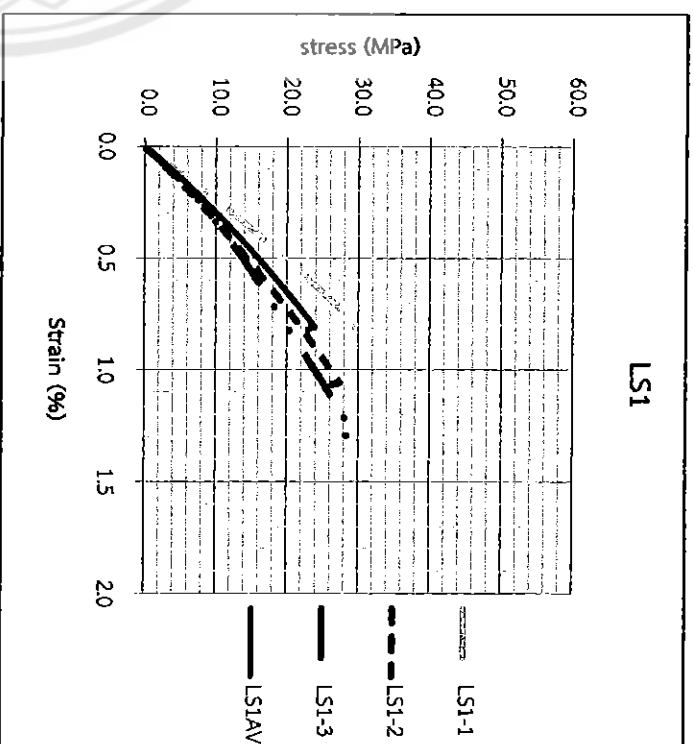
การทดสอบ : LS1

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.49 mm A=53.09%

ผลการทดลอง :

	LS1-1	LS1-2	LS1-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_f	29.95 MPa	27.59 MPa	29.52 MPa
Elongation	0.82 %	1.07 %	1.29 %
V_f	58.51%	53.33%	47.41%
V_m	41.49%	46.67%	52.59%
σ_f	26.30 MPa	25.26 MPa	26.01 MPa
Elongation	0.82 %	1.07 %	1.29 %



ค่าเฉลี่ย

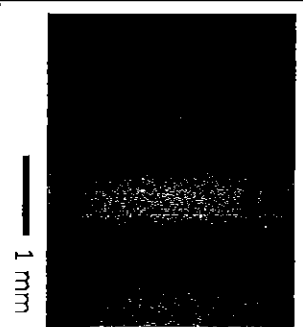
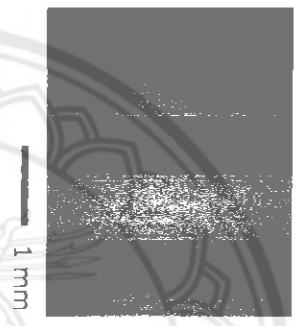




σ_f	29.02 MPa
Elongation	1.06 %
σ_f	25.86 MPa
Elongation	1.06 %

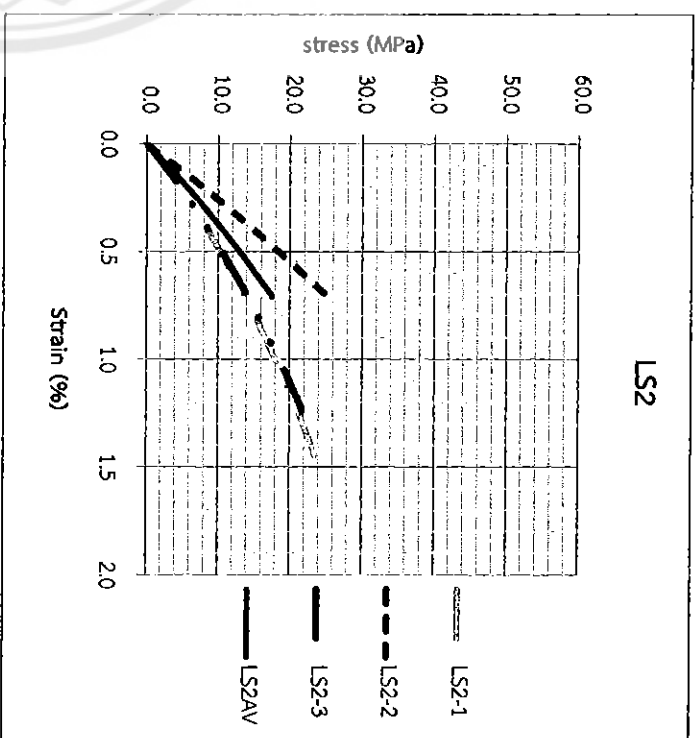
การทดสอบ : LS2

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.49 mm A=28.00%

ผลการทดลอง :

	LS2-1	LS2-2	LS2-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U	24.41 MPa	24.89 MPa	22.46 MPa
Elongation	1.53 %	0.70 %	1.30 %
σ_F	23.58 MPa	24.89 MPa	22.46 MPa
Elongation	1.53 %	0.70 %	1.30 %
	$V_f = 27.47\%$ $V_m = 72.53\%$	$V_f = 28.43\%$ $V_m = 71.57\%$	$V_f = 28.09\%$ $V_m = 71.91\%$



ค่าเฉลี่ย

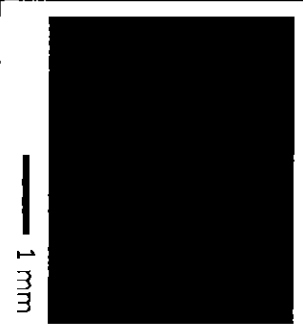


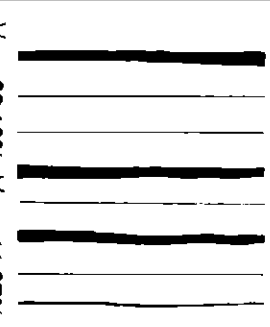

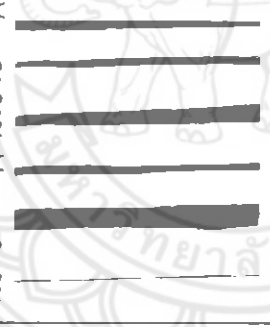
σ_U	23.92 MPa
Elongation	1.18 %
σ_F	23.64 MPa
Elongation	1.18 %

การทดสอบ : LMO

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.59 mm A=86.55%

ผลการทดลอง :

	LMO-1	LMO-2	LMO-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_u Elongation	39.89 MPa 2.48 %	40.89 MPa 1.38 %	41.41 MPa 1.85 %
σ_f Elongation	39.89 MPa 2.48 %	35.18 MPa 1.38 %	41.41 MPa 1.85 %

$V_f = 88.13\%$ $V_m = 11.87\%$

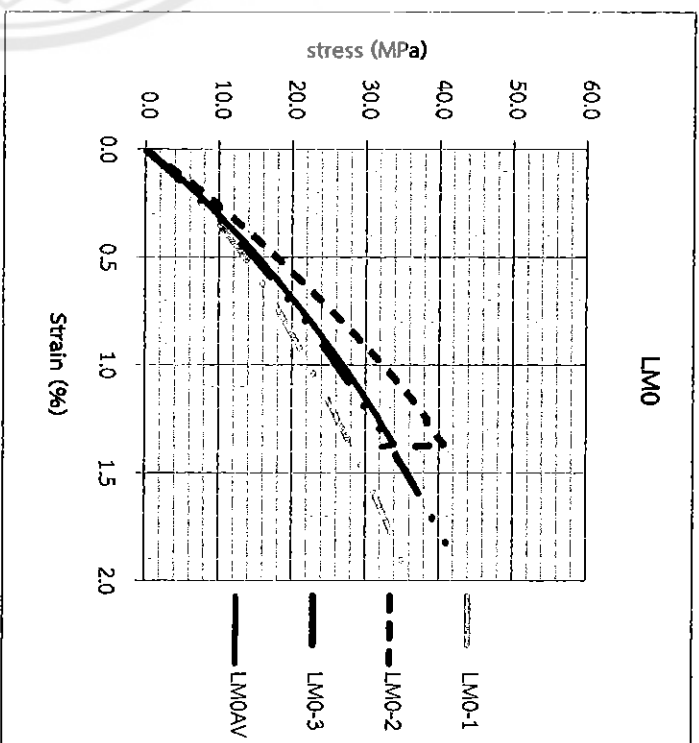
$V_f = 89.72\%$ $V_m = 10.28\%$

$V_f = 81.81\%$ $V_m = 18.19\%$

ค่าเฉลี่ย

40.73 MPa
1.90 %

38.83 MPa
1.90 %

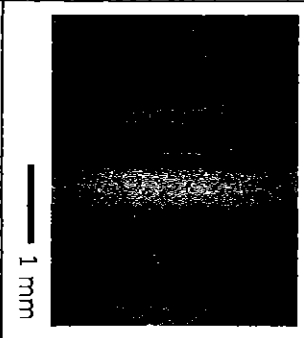


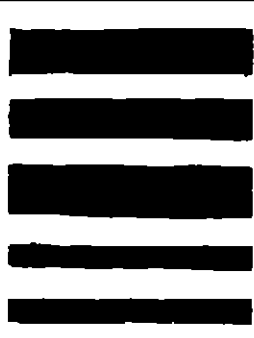




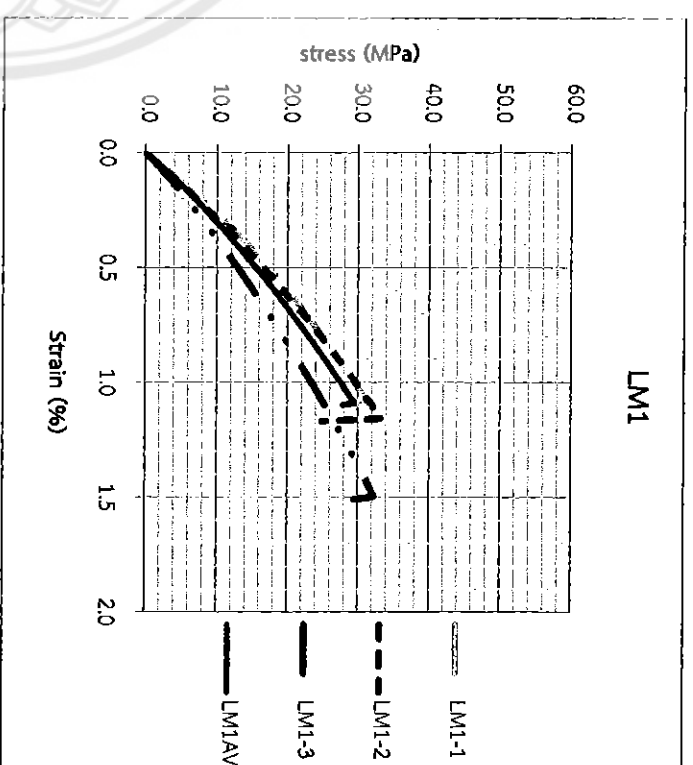
การทดสอบ : LM1

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.59 มม A=44.87%

ผลการทดลอง :

	LM1-1	LM1-2	LM1-3	
รูปถ่าย				
B&W				
σ_U Elongation	31.61 MPa 1.10 %	33.26 MPa 1.16 %	32.33 MPa 1.50 %	ค่าเฉลี่ย 32.40 MPa 1.25 %
σ_F Elongation	26.05 MPa 1.10 %	24.91 MPa 1.16 %	29.55 MPa 1.50 %	ค่าเฉลี่ย 26.84 MPa 1.25 %

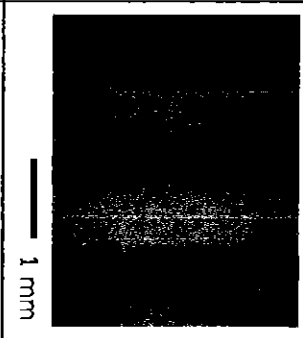
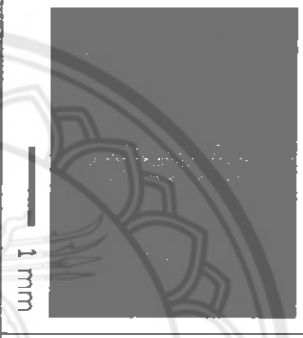

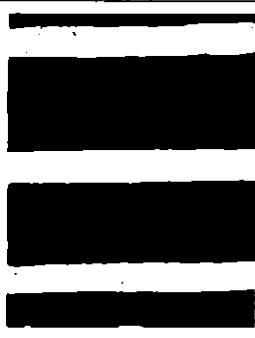




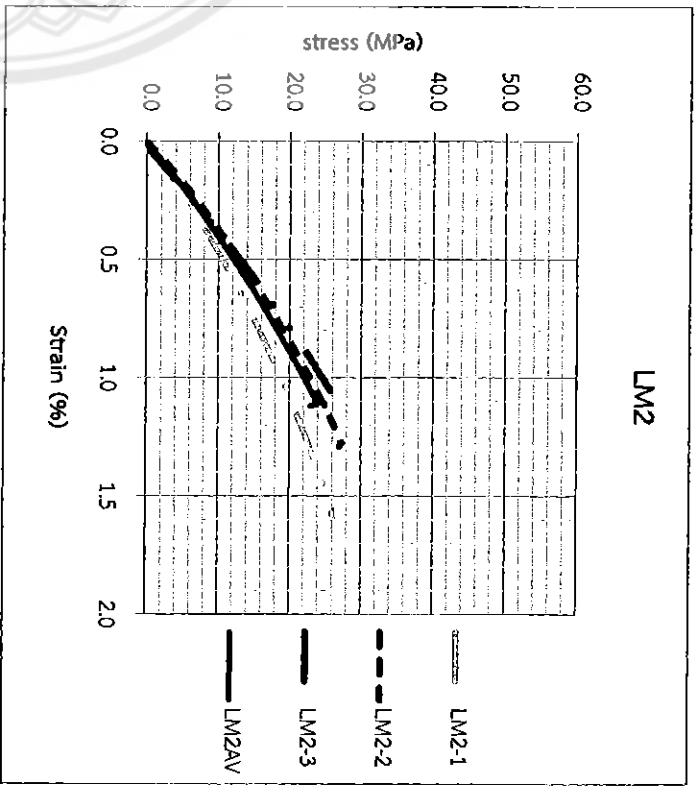
การทดสอบ : LM2

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.59 มม A=41.58%

ผลการทดลอง :

	LM2-1	LM2-2	LM2-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U	26.10 MPa	27.42 MPa	26.79 MPa
Elongation	1.57 %	1.28 %	1.11 %
σ_F	26.05 MPa	27.00 MPa	23.29 MPa
Elongation	1.58 %	1.28 %	1.11 %



ค่าเฉลี่ย

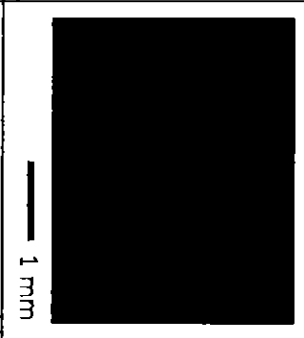

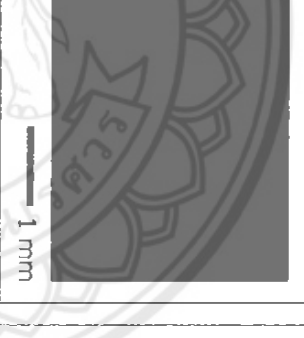
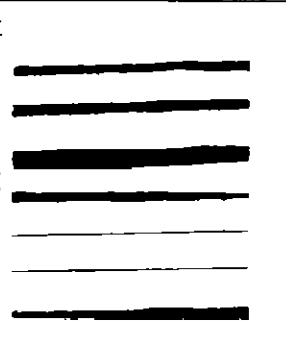

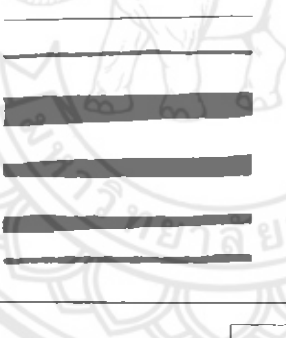
σ_U	26.77 MPa
Elongation	1.32 %
σ_F	25.45 MPa
Elongation	1.32 %

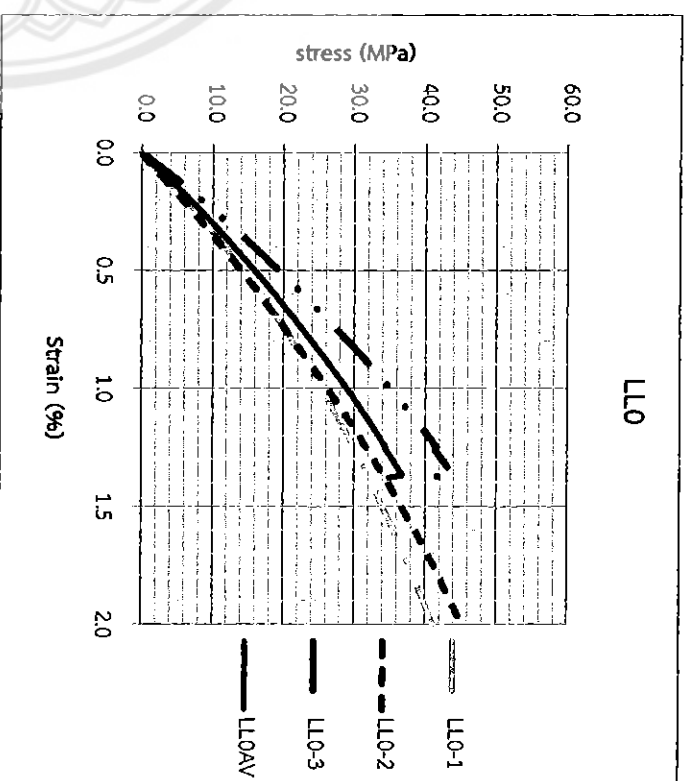
การทดสอบ : LL0

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.76 mm A=80.66%

ผลการทดลอง :

	LL0-1	LL0-2	LL0-3	
รูปถ่าย				
B&W				
σ_u Elongation	45.53 MPa 2.39 %	46.54 MPa 2.10 %	44.24 MPa 1.38 %	ค่าเฉลี่ย 45.43 MPa 1.96 %
σ_f Elongation	40.25 MPa 2.40 %	46.54 MPa 2.10 %	38.06 MPa 1.38 %	ค่าเฉลี่ย 41.61 MPa 1.96 %




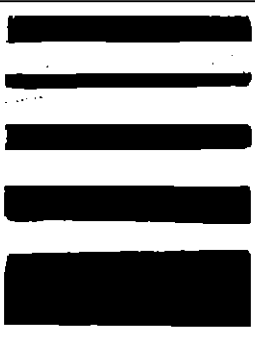




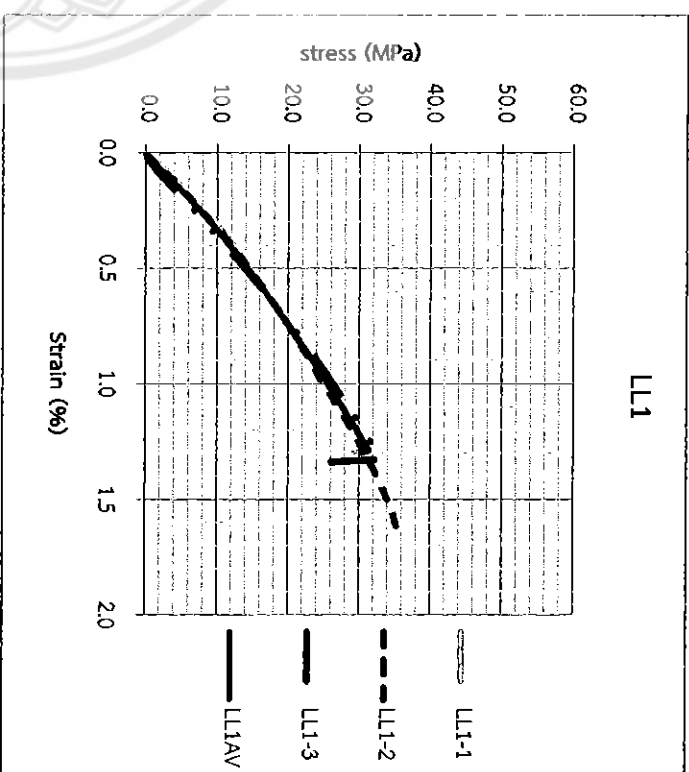
การทดสอบ : LL1

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.76 มม A=49.16%

ผลการทดลอง :

	LL1-1	LL1-2	LL1-3	
รูปถ่าย				
B&W	 $V_f = 44.49\%$ $V_m = 55.51\%$	 $V_f = 52.29\%$ $V_m = 47.71\%$	 $V_f = 50.69\%$ $V_m = 49.31\%$	ค่าเฉลี่ย
σ_U Elongation	31.38 MPa 1.29 %	35.28 MPa 1.64 %	33.27 MPa 1.33 %	33.31 MPa 1.42 %
σ_F Elongation	27.65 MPa 1.29 %	35.00 MPa 1.66 %	26.08 MPa 1.33 %	29.58 MPa 1.43 %

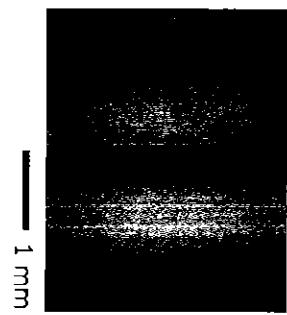







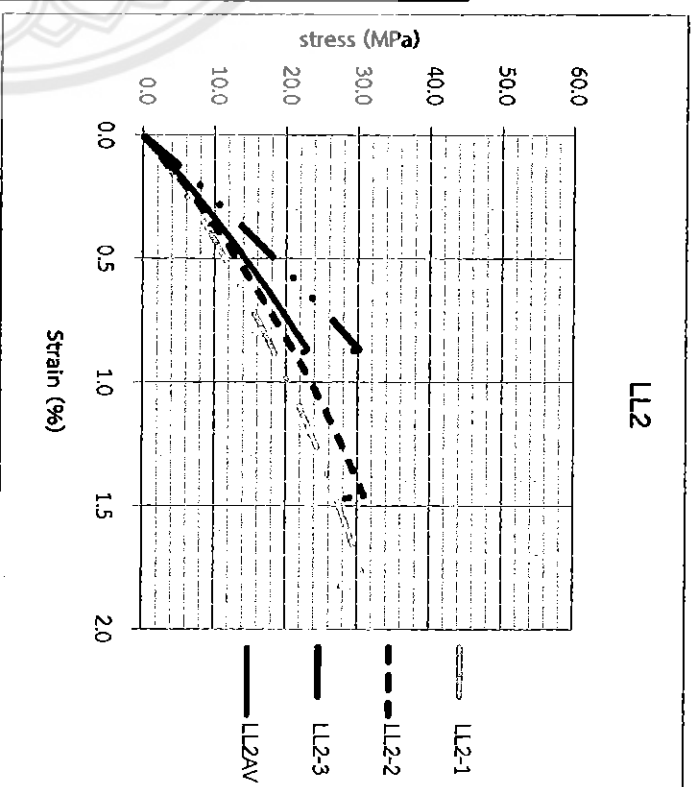
การทดสอบ : LL2

คำอธิบาย : การทดสอบความต้านทานแรงดึงซึ่งงานเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดยาว

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.76 mm A=31.06%

ผลการทดลอง :

	LL2-1	LL2-2	LL2-3
รูปถ่าย			
B&W			
σ_U Elongation	31.23 MPa 1.82 %	31.02 MPa 1.47 %	30.22 MPa 0.87 %
σ_F Elongation	27.75 MPa 1.82 %	28.38 MPa 1.47 %	27.88 MPa 0.87 %
	$V_f = 26.73\%$ $V_m = 73.27\%$	$V_f = 30.62\%$ $V_m = 69.38\%$	$V_f = 35.84\%$ $V_m = 64.16\%$



ค่าเฉลี่ย
30.82 MPa
1.39 %
28.00 MPa
1.39 %