

วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรด



นางสาวณัฏฐา ดิสรุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH ACID-TREATED SILK FABRIC



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile

Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพ
ด้วยกรด

โดย

นางสาวญาณิศา ดิสโร

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

5771962423 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: EPOXY COMPOSITES / ACID-TREATED SILK / SURFACE ROUGHNESS / ADHESION ABILITY

YANISA DISRO: EPOXY COMPOSITES REINFORCED WITH ACID-TREATED SILK FABRIC. ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D., 101 pp.

This research was aimed at enhancing impact toughness of epoxy composites using acid-treated silk fabrics. Firstly, woven silk fabrics were subject to tension-free treatment using formic acid and 85% phosphoric acid at various times. Then, epoxy composites reinforced with acid-treated silk fabrics were prepared by hand lay-up technique. In this study, epoxy composites having silk fabrics of 2, 4 and 6 layers were constructed. It was found that acid treatments played a crucial part in changing silk surface morphology, crystallinity and mechanical properties of treated silks as evidenced by SEM, XRD and tensile testing, respectively. In this study, two acids including formic acid and 85% phosphoric acid were employed. Those two acids were found to exhibit swell ability of silk filament, albeit at the different degree. Formic acid slowly diffused into beta-sheet crystallite. On the other hand, silk filament was immediately swollen in 85% phosphoric acid, causing loss of anisotropic structure of silk. Therefore, phosphoric acid-treated silk fabric was discarded. Formic acid-treated silk fabric was then employed for constructing epoxy composite. The results showed that impact strength of composites containing formic acid-treated silk fabric was significantly improved when compared to untreated silk fabric. Study results revealed that interfacial adhesion between epoxy and treated silk filament arising from formic acid treatment was a key factor in achieving the properties improvement.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science Advisor's Signature
and Textile Technology

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ทุกประการ เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือทางด้านความรู้ ความเอื้อเฟื้อในด้านวัสดุ อุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ปฏิบัติงานวิจัยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ดังรายนามต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งมีบทบาทมากที่สุดในการผลักดันงานวิจัยนี้ให้ประสบความสำเร็จ อีกทั้งคอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการวิจัย การแก้ปัญหา และการวิเคราะห์ผลการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อาจองค์ และ รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยชี้แนะแนวทางและตั้งคำถามให้ผู้วิจัยได้คิดวิเคราะห์ แก้ปัญหา รวมถึงจุดประกายความคิดใหม่ๆมากมาย

คณาจารย์ทุกท่าน ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยอบรมสั่งสอน และช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งการสนับสนุนด้านสถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน และที่สำคัญคือ เป็นผู้สนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้มาศึกษาหาความรู้ และหาประสบการณ์ต่างๆมากมาย ณ ที่แห่งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin).....	3
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซี.....	3
2.1.2 การสังเคราะห์อีพ็อกซี.....	4
2.1.3 สารเพิ่มความแข็ง.....	6
2.1.4 การทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลอีพ็อกซีและสารเพิ่มความแข็ง.....	8
2.1.5 สมบัติของอีพ็อกซี.....	10
2.1.6 การประยุกต์ใช้งานอีพ็อกซี.....	10
2.2 ไหม (silk).....	11
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของไหม.....	11
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของไหม.....	12
2.2.3 สมบัติของไหม.....	14
2.3 วัสดุเชิงประกอบ (composite materials).....	15

2.3.1	ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	16
2.3.2	วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย	17
2.4	กรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย	20
2.4.1	การขึ้นรูปโดยใช้มือทา (hand lay-up)	21
2.4.2	การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องพ่น (spray lay-up)	21
2.4.3	การขึ้นรูปโดยการพันเส้นใย (filament winding).....	22
2.4.4	การขึ้นรูปโดยใช้ถุงสุญญากาศ (vacuum bagging)	22
2.4.5	การขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบอัด (resin transfer moulding, RTM).....	23
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1	วัตถุประสงค์.....	25
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	29
3.3	เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบ	29
3.4	ขั้นตอนการทดลอง	30
3.5	การวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงาน.....	33
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	39
4.1	ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของผ้าไหม	39
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	39
4.1.2	วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผ้าไหมด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	40
4.1.3	วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าไหมด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มสเปกโทรสโกปี (FTIR).....	42
4.1.4	ศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	44
4.1.5	ทดสอบความทนแรงดึงของผ้าไหม (tensile properties).....	45

4.2 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี	49
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี	49
4.2.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM).....	50
4.2.3 ทดสอบความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี (impact testing).....	51
4.2.4 ทดสอบความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี (flexural testing)	53
4.2.5 วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC).....	54
4.2.6 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความ ร้อน (TGA).....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
รายการอ้างอิง	61
ภาคผนวก ก ดิฟแฟรกโทแกรมจากเทคนิค XRD ของผ้าไหม	66
ภาคผนวก ข สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหม	70
ภาคผนวก ค สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของผ้าไหม.....	74
ภาคผนวก ง สมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี	81
ภาคผนวก จ สมบัติความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี	88
ภาคผนวก ฉ เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี.....	95
ภาคผนวก ช เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ชนิดของกรดอะมิโนในเส้นใยไหม.....	14
ตารางที่ 3.1 สมบัติของอีพ็อกซีเรซินและตัวทำแข็ง.....	25
ตารางที่ 3.2 สมบัติของอีพ็อกซีที่ผ่านการบ่ม	26
ตารางที่ 3.3 สมบัติของกรดฟอร์มิก.....	27
ตารางที่ 3.4 สมบัติของกรดฟอสฟอริก.....	28
ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลึกของผ้าไหมที่คำนวณจากเทคนิค XRD.....	41
ตารางที่ 4.2 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก	45
ตารางที่ 4.3 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก	47
ตารางที่ 4.4 สมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม	51
ตารางที่ 4.5 สมบัติความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม	53
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม.....	55
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม	56

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซี.....	4
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์บิสฟีนอล เอ.....	4
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพ็อกซิโพลไฮดริน	5
รูปที่ 2.4	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพ็อกซี	5
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความแข็งกลุ่มเอมีน.....	7
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความแข็งกลุ่มลิวอิส	7
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความแข็งกลุ่มแอซิดแอนไฮไดรต์.....	8
รูปที่ 2.8	ปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่อีพ็อกไซด์.....	9
รูปที่ 2.9	ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลอีพ็อกซี	9
รูปที่ 2.10	ภาคตัดขวางของเส้นใยไหม.....	12
รูปที่ 2.11	โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยไหม.....	12
รูปที่ 2.12	โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไหม.....	13
รูปที่ 2.13	การเรียงตัวของสายโซ่ในเส้นใยไหม	13
รูปที่ 2.14	ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ.....	16
รูปที่ 2.15	ลักษณะของสารเสริมแรง	16
รูปที่ 2.16	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก.....	18
รูปที่ 2.17	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต	18
รูปที่ 2.18	ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆในเมทริกซ์	19
รูปที่ 2.19	ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย (multidirectional).....	20
รูปที่ 2.20	โครงสร้างลายผ้าทอ	20
รูปที่ 2.21	การขึ้นรูปโดยใช้มือทา.....	21
รูปที่ 2.22	การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องปั่น	21

รูปที่ 2.23 การขึ้นรูปโดยใช้การพันเส้นใย.....	22
รูปที่ 2.24 การขึ้นรูปโดยใช้ถุงสุญญากาศ.....	22
รูปที่ 2.25 การขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบอัด.....	23
รูปที่ 3.1 ผ้าไหมทอ.....	26
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟอร์มิก.....	27
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟอสฟอริก.....	28
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยผ้าไหม.....	31
รูปที่ 3.5 ทิศทางการวางผ้าไหมเพื่อเสริมแรง.....	32
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดชิ้นงาน CNC.....	32
รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์.....	33
รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	34
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	34
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์.....	35
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก.....	36
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง.....	36
รูปที่ 3.13 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	37
รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	38
รูปที่ 4.1 ลักษณะชิ้นงาน (a) ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (b) ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วย กรดฟอร์มิก และ (c) ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก.....	40
รูปที่ 4.2 X-ray diffractograms ของผ้าไหมที่สภาวะต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ.....	42
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก.....	43
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก.....	43
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของผ้าไหม.....	44

รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก.....	46
รูปที่ 4.8 การยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก.....	47
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก.....	48
รูปที่ 4.10 การยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก.....	49
รูปที่ 4.11 ลักษณะชิ้นงาน (a) อีพ็อกซีบริสุทธ์ และ (b) วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วย ผ้าไหม.....	49
รูปที่ 4.12 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก.....	51
รูปที่ 4.13 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม.....	52
รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม.....	54
รูปที่ 4.15 DSC thermograms ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม.....	55
รูปที่ 4.16 TGA thermogram ของอีพ็อกซีบริสุทธ์.....	56
รูปที่ 4.17 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับ สภาพ.....	57
รูปที่ 4.18 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วย กรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	57
รูปที่ 4.19 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วย กรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	58
รูปที่ 4.20 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วย กรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย

วิทยาการด้านวัสดุในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆมีคุณภาพสูงขึ้นเหมาะสำหรับนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบตามความต้องการของผู้บริโภค วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ทั้งนี้เพราะวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นวัสดุที่ให้ความแข็งแรงสูงในขณะที่น้ำหนักเบา มีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบนี้เป็นการรวมเอาข้อดีของวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาไว้ในวัสดุเดียวกัน เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติดีกว่าสมบัติเดิมของวัสดุเริ่มต้น นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติให้แก่วสดุได้ตรงตามจุดประสงค์ในการใช้งานด้วย โดยการปรับเปลี่ยนชนิดหรือสัดส่วนของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ อีพ็อกซีเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่ถูกผลิตขึ้นในยุคแรกๆ และเป็นเรซินหลักสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลแล้วอีพ็อกซีจะมีโครงสร้างแบบร่างแห และเกิดการคงรูป ส่งผลให้อีพ็อกซีมีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง ความเหนียวทนทาน ทนต่อการกัดกร่อน ทนสารเคมี ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความสามารถในการประสานและยึดเกาะกับเส้นใยธรรมชาติได้ดี [1] อย่างไรก็ตามอีพ็อกซียังคงความเปราะอยู่ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน จึงต้องมีการพัฒนาสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีให้ดียิ่งขึ้น โดยมีการศึกษาวิธีการปรับปรุงความเปราะไว้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่น่าสนใจและทำได้ง่ายคือ การใช้เส้นใยมาเป็นตัวเสริมแรงให้กับอีพ็อกซี สามารถนำมาใช้ได้ทั้งเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ [2] เส้นใยสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยไนลอน เป็นต้น ในขั้นตอนการผลิตต้องใช้พลังงานมากและมีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ อีกทั้งการกำจัดวัสดุสังเคราะห์หลังหมดอายุการใช้นั้นเป็นกระบวนการที่ยุ่งยาก และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกสู่บรรยากาศซึ่งส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม เส้นใยธรรมชาติจึงมีบทบาทสำคัญต่อการนำมาผลิตวัสดุเชิงประกอบ ในแง่ของการช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีงานวิจัยมากมายศึกษาการนำเส้นใยธรรมชาติมาเป็นตัวเสริมแรงทั้งเส้นใยไหม ปอ ป่าน ฝ้าย และกล้วย เป็นต้น [3, 4] ด้วยเหตุผลหลักคือหาได้ง่ายในประเทศไทย โดยเฉพาะเส้นใยไหม เป็นเส้นใยยาวที่มีโครงสร้างความเป็นผลึกสูงส่งผลให้มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี [5] ซึ่งเทียบเท่าได้กับเส้นใยสังเคราะห์เช่น เส้นใยแก้ว [6, 7] และที่โดดเด่นคือมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ

ชนิดอื่น เส้นใยไหมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงแทนที่เส้นใยสังเคราะห์ และเป็นการเพิ่มประโยชน์สำหรับการนำไปใช้สอยให้แก่เส้นไหมเพราะโดยส่วนใหญ่พบการใช้เส้นไหม เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมสิ่งทอผลิตเครื่องนุ่งห่มเท่านั้น วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจะมีความแข็งแรงสูงสุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย [8] ดังนั้นผ้าไหมทอจึงมีลักษณะที่ดีสำหรับใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ โดยผ้าทอจะทำหน้าที่รับและกระจายแรงกระทำจากภายนอกในทุกทิศทาง [9]

ในโครงการวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของอีพ็อกซี โดยการนำผ้าไหมทอมาเสริมแรงให้กับอีพ็อกซีเพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติความทนแรงกระแทกดีขึ้น และปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างอีพ็อกซีและผ้าไหม ให้ดียิ่งขึ้นด้วยการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นไหมด้วยกรดฟอรั่มิก และกรดฟอสฟอริก จากนั้นขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมด้วยวิธีการทาด้วยมือ แล้ววิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผ้าไหมและอีพ็อกซี ศึกษาผลของกรดที่มีต่อเส้นไหม ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นไหม และสมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด เทียบกับวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด
2. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีที่เตรียมได้

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin)

อีพ็อกซีถูกค้นพบโดย Dr. Pierre Castan เมื่อปี 1938 ที่ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ [10] คำว่า อีพ็อกซี เกิดจากการผสมคำสองคำ คือ epi และ oxygen โดย epi มาจากภาษากรีกโบราณแปลว่า on the outside of เมื่อรวมกันมีความหมายว่า การแบ่งส่วนของอะตอมออกซิเจนออกจากกันใน โครงสร้างโมเลกุล

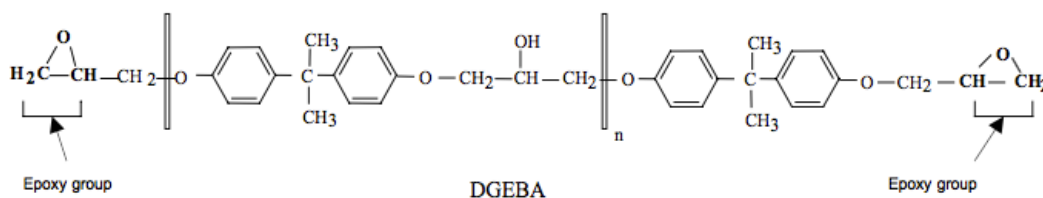
อีพ็อกซีเรซิน เป็นเรซินหลักที่สำคัญสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากมีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตเมื่อเทียบกับเรซินกลุ่มอื่นๆเช่น พอลิเอสเทอร์เรซิน (polyester resin) และพอลิอิมิดเรซิน (polyimide resin) เป็นต้น อีพ็อกซีเรซินมีสมบัติที่ดีทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติเชิงกลเช่น ความเหนียวทนทาน (toughness) ทนต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงดีเยี่ยม ในขณะเดียวกันก็มีความทนทานต่อการดัดโค้ง (flexural strength) ไม่เกิดการคราก (creep) สามารถยึดเกาะกับเส้นใยได้ดีเยี่ยม [11-13] และง่ายต่อการขึ้นรูป ซึ่งสมบัติเหล่านี้ยังสามารถปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยการปรับแต่งโครงสร้างเคมีหลักของตัวอีพ็อกซีเรซินเอง และสารบ่ม (curing agent) หรือตัวทำให้แข็ง (hardener) ภายหลังจากบ่มจะไม่มีสารตกค้างที่ไม่ต้องการหลงเหลือในชิ้นงาน

อีพ็อกซีเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (thermoset polymer) เมื่อได้รับความร้อนอีกครั้ง อีพ็อกซีไม่สามารถหลอมละลายขึ้นรูปได้ใหม่ แต่จะเกิดการไหม้และสลายตัว อีพ็อกซีมีโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างแห โดยโครงสร้างลักษณะนี้ส่งผลให้อีพ็อกซีมีความแข็งแรงสูงมาก และมีความคงรูปที่ดี ลักษณะเฉพาะในการใช้งานเรซินคือ ต้องเตรียมพรีพอลิเมอร์ (pre-polymer) ก่อนซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่สั้นๆ จากนั้นจึงผสมกับตัวทำแข็งแล้วนำไปขึ้นรูป ตัวทำแข็งจะทำหน้าที่เชื่อมสายโซ่โมเลกุลเข้าด้วยกัน

2.1.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซี

โครงสร้างเคมีเป็นหัวใจหลักที่มีผลต่อสมบัติของอีพ็อกซี ในโครงสร้างโมเลกุลอีพ็อกซีจะมีหมู่หลักคือ พอลิเมอร์ที่มีวงสามเหลี่ยม เรียกว่าหมู่อีพ็อกซี หรือหมู่ออกซิเรน (oxirane group)

ประกอบด้วยคาร์บอนสองอะตอมและออกซิเจนหนึ่งอะตอมอยู่ที่ปลายสายโซ่เป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

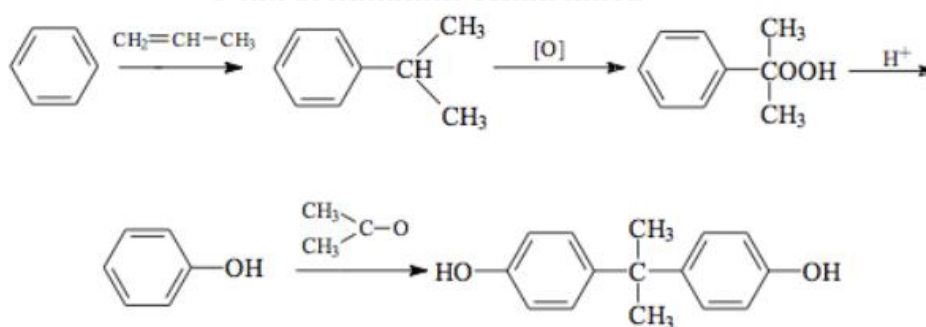


รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอีพ็อกซี [14]

2.1.2 การสังเคราะห์อีพ็อกซี

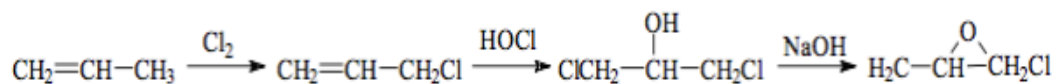
อีพ็อกซีเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) สังเคราะห์ขึ้นจากบิสฟีนอล เอ (bisphenol A) กับอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) และสารเพิ่มความแข็งหรือสารบ่มเป็นสารประเภทพอลิเอมีน (polyamine) โดยปฏิกิริยาจะเกิดที่หมู่อีพ็อกไซด์ (epoxide group) ของอีพ็อกซีเรซินกับหมู่เอมีน (amine group) ของสารเพิ่มความแข็ง

บิสฟีนอล เอ มีสูตรโมเลกุลคือ $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OH})_2$ เป็นสารเคมีประเภทพอลิคาร์บอนेट (polycarbonate) เป็นของแข็งใส ไม่มีสี ไม่แตกหักง่าย และสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ แต่ไม่ละลายในน้ำ



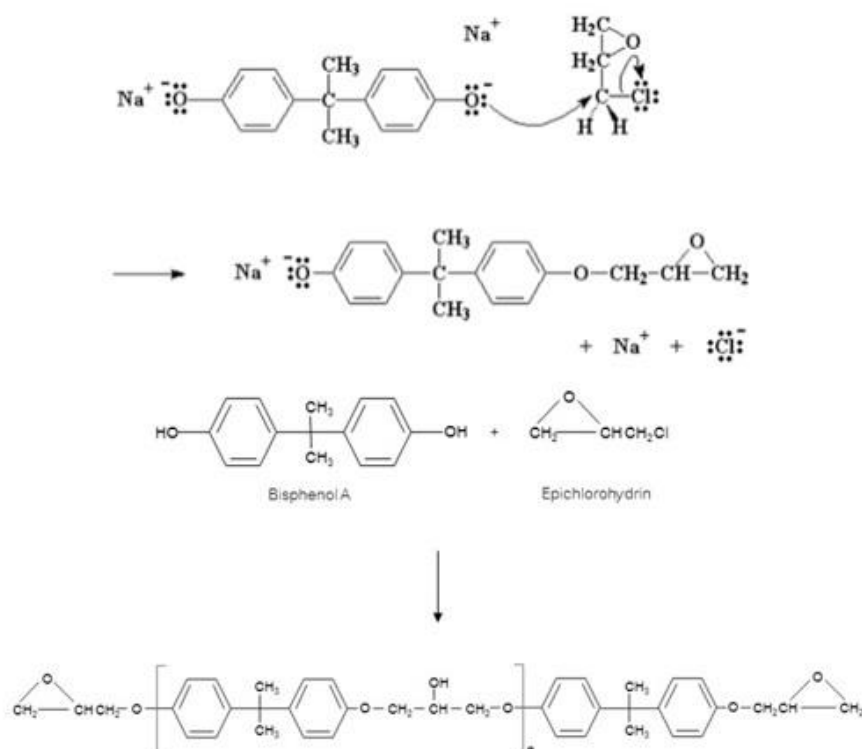
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์บิสฟีนอล เอ [15]

ส่วนอพิคลอโรไฮดริน มีสูตรโมเลกุล C_3H_5ClO เป็นของเหลวไม่มีสี มีกลิ่นฉุนคล้ายกระเทียม ติดไฟได้ง่าย และสามารถละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาการสังเคราะห์อพิคลอโรไฮดริน [15]

อพิออกซีเรซินจะถูกเปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซตโดยการเกิดปฏิกิริยาของหมู่อพิออกไซด์ ซึ่งอาจจะเกิดปฏิกิริยากับตัวมันเองกลายเป็นไฮโมพอลิเมอร์ หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับสารเชื่อมโยงโมเลกุล ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาอาจจะเกิดอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือเกิดทั้งสองอย่างก็ได้ อพิออกไซด์เป็นของเหลว เมื่อต้องการทำให้มีแรงยึดเกาะและแข็งขึ้นจะต้องเติมตัวทำแข็งเพื่อทำให้ของเหลวกลายเป็นของแข็ง ตัวทำแข็งนี้จะไปทำปฏิกิริยากับอพิออกซีเรซิน ถ้าสารทั้งสองทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์จะทำให้ อพิออกไซด์ที่แข็งตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าการผสมไม่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดจุดที่อ่อนแอในโมเลกุล



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาการสังเคราะห์อพิออกซี [14, 15]

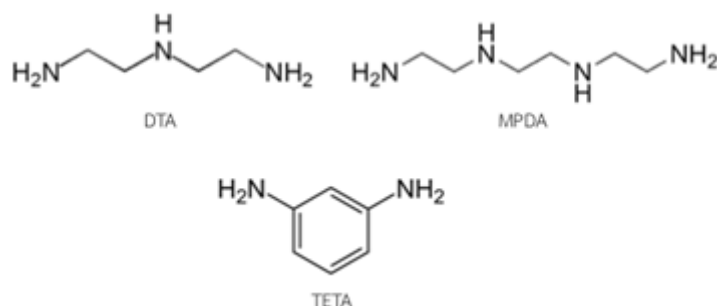
จากโครงสร้างของอีพ็อกซีจะปรากฏตัวอักษร n เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยที่ซ้ำกัน (repeating unit) โดย n มีค่าตั้งแต่ 0 ขึ้นไป ตัวเลขนี้จะสัมพันธ์กับสมบัติของอีพ็อกซี ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างอีพอกซีโพลีไฮดริน และบิสฟีนอล เอ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ หาก n มีค่าต่ำ อีพอกซีจะอยู่ในรูปของเหลว และจะมีลักษณะเป็นของแข็งเมื่อ n มีค่าสูงประมาณ 20-30 โดยยังมีปริมาณของบิสฟีนอล เอ มาก อีพอกซีที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็ง

2.1.3 สารเพิ่มความแข็ง

ส่วนประกอบที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ทำให้อีพอกซีแข็งตัวคือ สารเพิ่มความแข็ง (hardener) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สารบ่ม (curing agent) ทำหน้าที่เชื่อมขวางโมเลกุลเพื่อให้เกิดโครงสร้างร่างแหจำนวนมาก สารบ่มสำหรับอีพอกซีแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ กลุ่มเอมีน (amine) กลุ่มลิวอิส (Lewis acid) และกลุ่มแอนไฮไดรด์ (acid anhydride)

2.1.3.1 สารเพิ่มความแข็งกลุ่มเอมีน

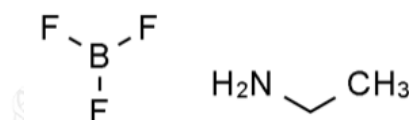
สารเพิ่มความแข็งกลุ่มนี้นิยมใช้กันโดยทั่วไป มีหลายชนิดทั้งเอมีนทุติยภูมิ (tertiary amine) และพอลิฟังก์ชันนอลเอมีน (polyfunctional amine) เป็นสารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งแบ่งตามความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างสารเชื่อมโยงกลุ่มเอมีน เช่น ไดเอทิลีนไตรเอมีน (diethylenetriamine, DTA) ไตรเอทิลีนเตตราเมีน (triethylenetetramine, TETA) เมตา-ฟีนิลีนไดเอมีน (m-phenylenediamine, MPDA) เป็นต้น โดยทั่วไปอะลิฟาติกเอมีน (aliphatic amine) หรือสารประกอบเอมีนแบบปฐมภูมิ (primary amine) จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้เร็วกว่า และเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธี hand lay-up และมักจะนำไปใช้ในงานทางด้านการเคลือบผิวและเป็นสารยึดติด ในขณะที่อะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) มีความว่องไวค่อนข้างต่ำ จึงใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า และต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงเนื่องจากมีโครงสร้างของวงเบนซีน (benzene ring) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีประสิทธิภาพดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้ในภาวะที่มีแรงเสียดทานสูงเช่น ยานอวกาศ หรือเครื่องบิน เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความแข็งกลุ่มเอมีน

2.1.3.2 สารเพิ่มความแข็งกลุ่มกรดลิวอิส

อีพ็อกซีเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของโมเลกุลผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยกลไกแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ที่บริเวณหมู่อีพอกไซด์ด้วยสารเพิ่มความแข็งประเภทกรดลิวอิสหรือสารเอมีนแบบตติยภูมิ เช่น โบรอน ไตรฟลูออไรด์ มอนอเอทิลเอมีน (boron trifluoride monoethylamine, BF_3MEA) เป็นสารแข็งซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้องและมีอายุหลังบ่มค่อนข้างยาวถึง 6 เดือน โดยที่เรซินไม่แข็งตัว

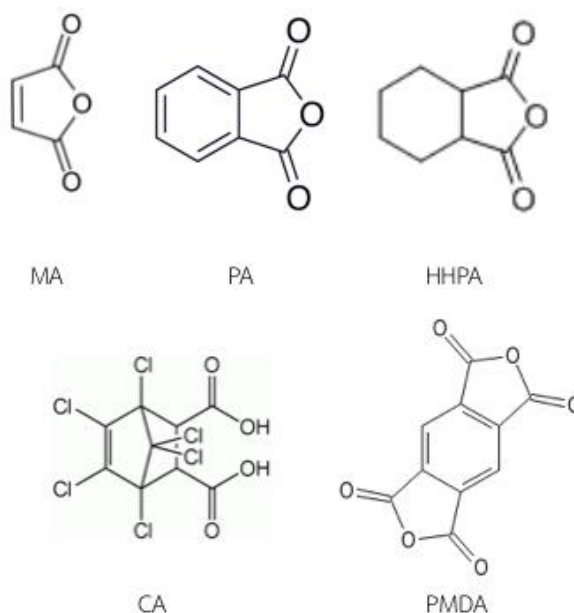


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความแข็งกลุ่มลิวอิส

2.1.3.3 สารเพิ่มความแข็งกลุ่มแอนไฮไดรด์ (acid anhydride)

สำหรับเรซินที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ต่ำ อาจใช้สารเพิ่มความแข็งกลุ่มแอนไฮไดรด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลผ่านหมู่ไฮดรอกไซด์ที่อยู่ภายในสายโซ่ ตัวอย่างของสารเพิ่มความแข็งกลุ่มนี้ เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) พทาสิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride, PA) ไพโรเมลลิติก ไดแอนไฮไดรด์ (pyromellitic dianhydride, PMDA) คลอเรนดิกแอนไฮไดรด์ (chlorendic anhydride, CA) และเฮกซะไฮโดรพทาสิกแอนไฮไดรด์ (hexahydrophthalic anhydride, HHPA) เป็นต้น โดยปกติแล้วสารประเภทแอนไฮไดรด์เป็นสารดูดความชื้น ซึ่งความชื้นจะเปลี่ยนสภาพแอนไฮไดรด์ให้เป็นกรดส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมต้องคำนึงถึงปัจจัยนี้ด้วย ปฏิกิริยาระหว่างแอนไฮไดรด์กับอีพอกซีค่อนข้าง

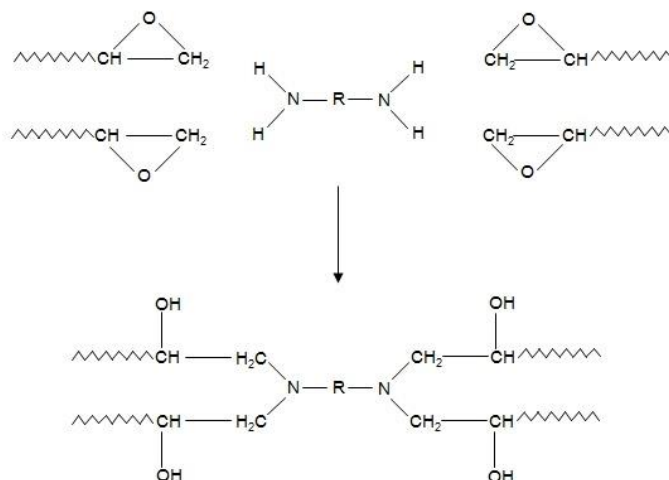
ซับซ้อน และผลิตน้ำออกมาระหว่างเกิดปฏิกิริยาทำให้วัสดุเกิดฟอง อีกทั้งสารเพิ่มความแข็งแรงประเภทนี้มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องจึงละลายในอีพ็อกซีเรซินได้ยาก



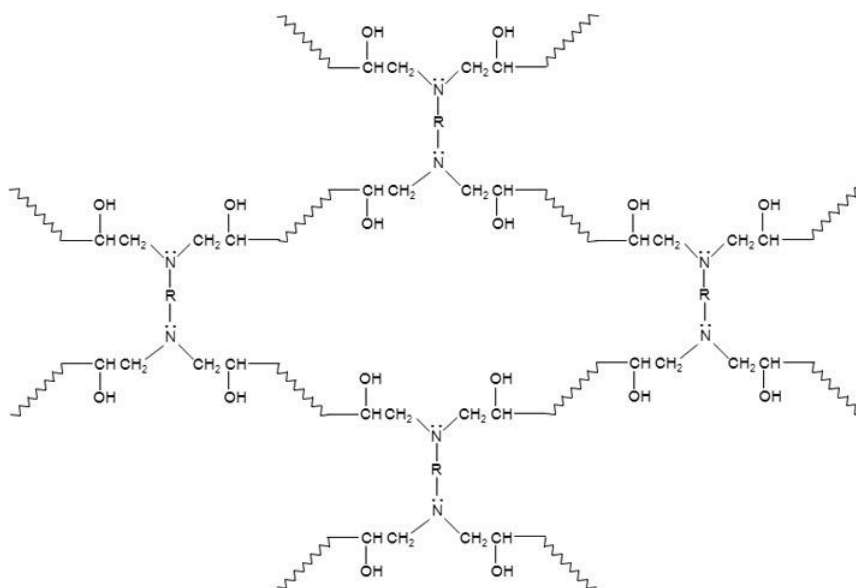
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความแข็งแรงกลุ่มแอซิดแอนไฮไดรด์

2.1.4 การทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลอีพ็อกซีและสารเพิ่มความแข็งแรง

สารเพิ่มความแข็งแรงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สารกลุ่มเอมีน เมื่อเกิดการเชื่อมขวางแล้วจะทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหในโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนของสารเพิ่มความแข็งแรงกับหมู่อีพอกไซด์ของอีพ็อกซีเรซิน (รูปที่ 2.8) โดยจะเกิดการเชื่อมต่อไปเรื่อยๆระหว่างโมเลกุล (รูปที่ 2.9) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยโปรตอน (H) ของเอมีน ดังนั้นปริมาณการเกิดปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับจำนวนโปรตอนของเอมีน ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ทั้งหมู่อีพอกไซด์ที่ปลายสายโซ่ และหมู่ไฮดรอกซีที่บริเวณกลางสายโซ่ และในระหว่างการแข็งตัวจะมีความร้อนเกิดขึ้นด้วย วัสดุอีพ็อกซีที่ได้จะมีสภาพแข็งเกร็ง (rigid) ไม่หดตัว สามารถตัด เจาะ กิ่ง หรือเลื่อยได้



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่อีพอกไซด์ [14]



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลอีพอกไซด์ [14]

2.1.5 สมบัติของอีพ็อกซี

อีพ็อกซีมีหมู่ที่แสดงสมบัติเฉพาะขนาดใหญ่ดังนั้นจึงยากต่อการสังเคราะห์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ แต่อีพ็อกซีมีสารสำหรับทำให้แข็งหลายชนิด จึงเน้นในการเลือกใช้สารเพิ่มความแข็งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยหลายอย่างเช่น เวลาที่ใช้ในการบ่ม อุณหภูมิในการบ่ม และสารเติมแต่ง ก็ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์อีพ็อกซีด้วย ในการทำปฏิกิริยาของอีพ็อกซีจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งในกรณีที่ไม่มีสารระเหยออกจากระบบ อีพ็อกซีที่ได้ก็จะมีปัญหาเรื่องการหดตัว โครงสร้างหลักของอีพ็อกซีเสถียรต่อความร้อนได้ดี แต่เสถียรภาพทางความร้อนจะขึ้นอยู่กับการเชื่อมขวางด้วย ดังนั้นระบบที่มีการเชื่อมขวางด้วยสารกลุ่มเอมีนจะเสถียรต่อความร้อนประมาณ 200 องศาเซลเซียส ในขณะที่ระบบที่มีการเชื่อมขวางด้วยสารกลุ่มเอมีนจะเสถียรต่อความร้อนประมาณ 150 องศาเซลเซียส อีพ็อกซีจึงมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และมีความเป็นขั้วสูง ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดี

อีพ็อกซีที่เกิดการเชื่อมขวางแล้วจะไม่สามารถละลายได้ในสารละลายต่างๆ แต่จะบวมตัวในของเหลวที่มีค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกัน เช่น สารละลายคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbons) หรือแอลกอฮอล์ (alcohol) โดยอีพ็อกซีที่เชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์จะทนต่อสารละลายกรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ และสารอัลคาไลซ์ ในขณะที่อีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะเอสเทอร์จะไม่ทนต่อสารอัลคาไลซ์เข้มข้น กรดอินทรีย์ และอนินทรีย์ ส่วนอีพ็อกซีที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะคาร์บอนและไนโตรเจน ซึ่งเกิดจากการใช้สารเพิ่มความแข็งกลุ่มเอมีนจะไม่ทนต่อกรดอนินทรีย์

2.1.6 การประยุกต์ใช้งานอีพ็อกซี

อีพ็อกซีนิยมนำมาใช้เป็นกาวและสารยึดติด สามารถใช้ยึดติดกับวัสดุได้หลากหลายประเภท เช่น ไม้ เหล็ก พลาสติก เส้นใย แก้ว คอนกรีต รวมถึงเครื่องสุขภัณฑ์ด้วย นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคลือบพื้นผิว มักจะใช้ในการเคลือบผิวภายในอาคารในส่วนของพื้นอาคารหรือพื้นโรงงาน เนื่องจากอีพ็อกซีมีสมบัติทนแรงกระแทก ทนการขีดขีด เสียดสี ทนสารเคมี ทนความร้อนได้ดี แต่ไม่ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จึงมักนำมาใช้ภายในอาคาร อีกทั้งยังสามารถนำอีพ็อกซีมาหล่อขึ้นรูปเป็นแม่แบบในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องมืออุตสาหกรรม เป็นส่วนประกอบในสารกึ่งตัวนำ ระบบไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า

2.2 ไหม (silk)

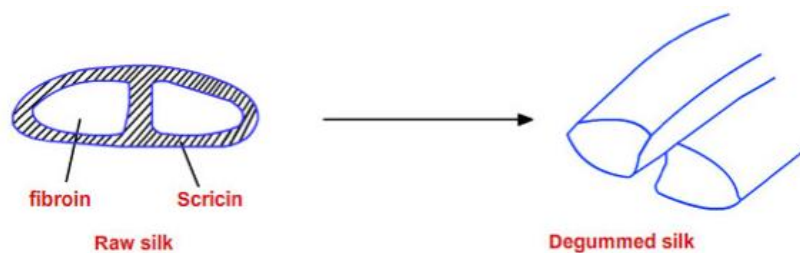
ไหมเรียกได้ว่าเป็น ราชนิแห่งเส้นใย เนื่องจากมีความมันเงาแสดงถึงความสวยงามหรูหรา ไหมเป็นเส้นใยยาวที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ มีต้นกำเนิดมาจากประเทศจีนซึ่งเป็นชาติแรกที่ผลิตผ้าไหม เมื่อประมาณ 2600 ปีก่อนคริสตศักราช สำหรับประเทศไทยมีการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมมานานกว่า 3000 ปี และเริ่มส่งเสริมด้านการทอผ้าไหมตั้งแต่ช่วงรัชกาลที่ 5 มีการพัฒนาคุณภาพของผ้าไหม เพื่อให้กลายเป็นสินค้าส่งออก การเลี้ยงหม่อนไหมพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย

โดยทั่วไปสามารถจำแนกไหมออกเป็น 2 ประเภท คือ ไหมเลี้ยง (mulberry silk) หรือชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ ไหมบอมบิกซ์มอริ (*Bombyx mori*) และไหมป่า (wild silk) เช่น ไหมอีรี (*Eri silk*) ซึ่งมีอยู่ในประเทศไทย ไหมเลี้ยงคือ หม่อนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยง ไหมชนิดนี้จะมีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาจะมี ความมันเงาเพิ่มขึ้น สำหรับไหมป่าเป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยง แต่ไหมป่าจะเลี้ยงตัวเองด้วยการกินใบโอ๊ค ซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล มีความหยاب และขนาดเส้นใยไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับไหมเลี้ยง

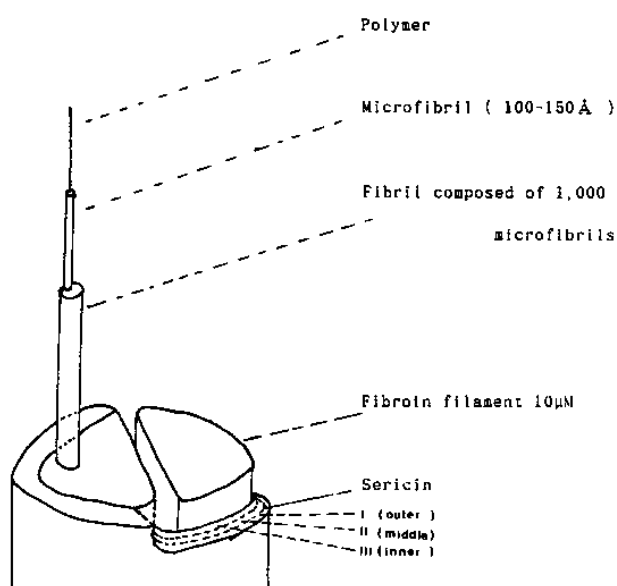
เส้นไหมเมื่อยังอยู่ในตัวของหม่อนไหม จะมีลักษณะเป็นของเหลวอยู่ในต่อมไหม เมื่อต่อมไหมเจริญเติบโตเต็มที่จนเข้าไปเบียดในกระเพาะอาหาร ทำให้หม่อนไหมไม่สามารถกินอาหารต่อไปได้อีก จึงเกิดกระบวนการบีบตัวเองให้ของเหลวที่อยู่ในต่อมไหมพุ่งออกมาทางรูใกล้ปากของตัวหม่อน

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพของไหม

ไหมเป็นเส้นใยโปรตีนถูกสร้างขึ้นในต่อม (gland) ประกอบด้วยไฟโบรอิน (fibroin) ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยคู่ และถูกเคลือบด้วยกาวไหมเซรีซิน (sericin) ประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไหมทั้งหมด เส้นไหมดิบมีความหนาประมาณ 24-30 ไมครอน มีภาคตัดขวางคล้ายรูปสามเหลี่ยมมุมมน ขนาดและรูปร่างของเส้นไหมไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อกำจัดกาวไหมออกจะได้เส้นไหมที่ผิวด้านนอกมีความเรียบตรง กาวไหมเป็นสารหล่อลื่นให้แก่การเคลื่อนตัวของไฟโบรอินเพื่อลดการเสียดสีของไฟโบรอินที่จะเกิดกับต่อมไหม เนื่องจากสารไฟโบรอินที่อยู่ในตัวหม่อนไหมมีลักษณะค่อนข้างแข็งและมีความฝืดสูง นอกจากนี้เซรีซินยังทำหน้าที่เป็นกาวธรรมชาติเพื่อเชื่อมเส้นไหมเข้าด้วยกัน [16]



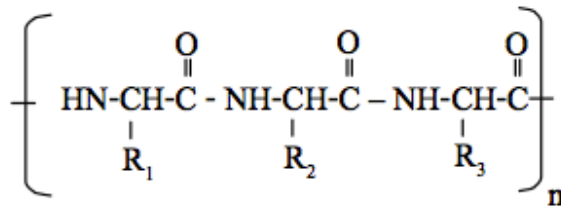
รูปที่ 2.10 ภาคตัดขวางของเส้นใยไหม



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยไหม

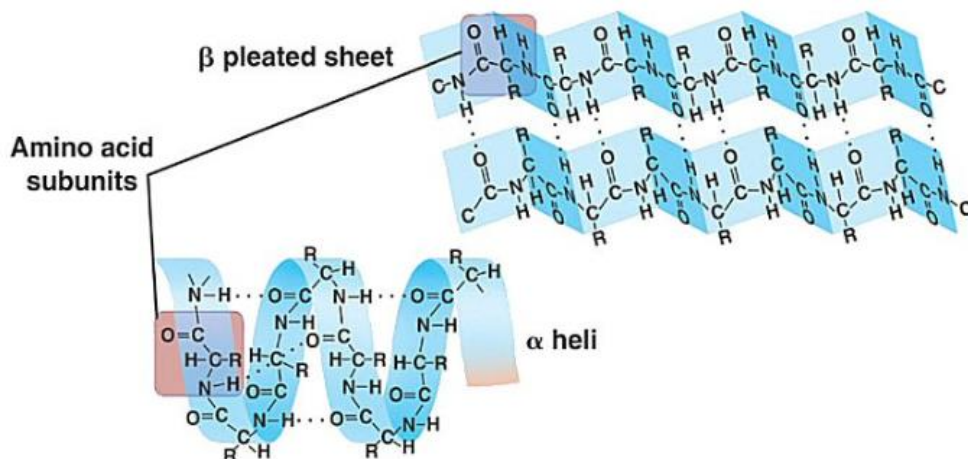
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของไหม

โครงสร้างของไหมส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีนซึ่งมีแต่เพปไทด์ (peptide) มาต่อกันเป็นพอลิเพปไทด์ (polypeptide) มีธาตุที่สำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน สูตรเคมี $(C_{24}H_{38}O_8N_8)_n$ ประกอบด้วยกรดอะมิโน 16 ชนิดตามตารางที่ 2.1 โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นกรดอะมิโน 4 ชนิด คือ ไกลซีน (glycine) อะลานีน (alanine) เซรีน (serine) และไทโรซีน (tyrosine) และโปรตีนของเส้นใยไหมไม่มีส่วนที่เรียกว่า cystine จึงไม่มีกำมะถัน (sulphur) เป็นส่วนประกอบ และไม่มีพันธะไดซัลไฟด์ (disulphide) อยู่ในโครงสร้าง [17]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไหม

โปรตีนไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ไม่มีซัลเฟอร์หรือมีซัลเฟอร์ในปริมาณมาก เกิดเป็นโครงสร้างผลึกแบบเบต้าชีต (β -sheet) ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ เรียงพับไปมาชิดกันแน่นเป็นระเบียบ สายโซ่แต่ละสายจะเรียงตัวในลักษณะสวนทางกัน (antiparallel) และยึดเกาะกันระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่วนที่เหลือเป็นอสัณฐาน (amorphous) และน้ำ [18]



รูปที่ 2.13 การเรียงตัวของสายโซ่ในเส้นใยไหม

กาวไหมเซรีซินประกอบด้วย เซรีน (serine) ธรีโอนีน (threonine) กรดแอสพาทิก (aspartic acid) กรดกลูตามิก (glutamic acid) และอาร์จินีน (arginine) กรดอะมิโนในเซรีซินมีซัลเฟอร์สูง จึงละลายได้ง่ายในตัวทำละลายมีซัลเฟอร์ และโครงสร้างของเซรีซินไม่มีส่วนที่เป็นผลึกเลย ก่อนนำไปใช้งานจะต้องลอกกาวไหมเซรีซินออกก่อนเนื่องจากไหมดิบมีความหยาบกระด้าง เซรีซินสามารถละลายได้ในกรดที่มี pH ต่ำกว่า 2.5 และละลายได้ในเบสที่มี pH สูงกว่า 9.5 นอกจากไฟโบรอินและเซรีซินแล้ว ไหมดิบยังมี น้ำ แร่ธาตุ เกลือ ไขมัน และสารสีประกอบอยู่ในปริมาณเล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 ชนิดของกรดอะมิโนในเส้นใยไหม [19]

กรดอะมิโน	ปริมาณกรดอะมิโนที่มีในเส้นใยไหม (%)
Alanine	26.5
Arginine	1.71
Aspartic acid	1.29
Glutamic acid	0.97
Glycine	43.99
Histidine	0.50
Iso-leucine	0.64
Methionine	0.58
Phenylalanine	0.89
Proline	0.40
Serine	11.41
Threonine	0.90
Tryptophan	0.29
Tyrosine	5.35
Valine	2.10
Other residues with nitrogen	1.91

2.2.3 สมบัติของไหม

ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากที่สุด เพราะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง และเป็นพอลิเมอร์โซ่ตรง (linear polymer) มีพันธะไฮโดรเจนที่เรียงตัวสม่ำเสมอ แต่เมื่อเปียกน้ำความแข็งแรงของเส้นใยจะลดลง นอกจากนั้นเส้นใยไหมมีความยืดหยุ่นพอสมควรแต่อาจแตกต่างกันตาม

ขั้นตอนการสาวเส้นไหมออกจากรัง เส้นใยไหมสามารถคืนตัวกลับที่ความยาวเดิมได้อย่างซ้ำๆ และสูญเสียความยืดหยุ่นไปที่ละน้อย

ในด้านเสถียรภาพทางความร้อน เส้นใยไหมมีความว่องไวต่ออุณหภูมิที่สูงเกิน 100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พันธะเพปไทด์ พันธะไฮโดรเจน และพันธะเชื่อมโยงของเกล็ดภายในสายโซ่โมเลกุลของไหมสลายตัว ทำให้ความเหนียวลดลง เส้นใยไหมไม่นำไฟฟ้าและไม่นำความร้อน ในบางครั้งการนำไปใช้งานอาจเกิดไฟฟ้าสถิต

ผ้าไหมทนต่อการเกิดเชื้อราได้ดี แต่ไหมละลายได้ในเบสแก่และสารละลายโซดาไฟ (caustic soda) ที่ร้อน สำหรับเบสอ่อนเช่น แอมโมเนีย จะละลายไหมได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ทำลายไหมเลย ในกรณีของกรด ไหมสามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น แต่กรดไนตริกจะทำให้เส้นใยไหมกลายเป็นสีเหลือง นอกจากนี้สารฟอกขาวที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบมีผลต่อความเหนียวของเส้นใยไหม ไหมไม่ทนต่อแสงแดด เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้ไหมเกิดการสลายตัว (photo degradation) และทำให้ไหมกลายเป็นสีเหลือง [20] นอกจากนี้เมื่อเส้นใยไหมติดไฟ จะเกิดการลุกไหม้อย่างซ้ำๆ แต่เมื่อนำออกจากแหล่งให้ความร้อน เปลวไฟจะดับเอง และมีเถ้าเกิดขึ้นขณะเผาไหม้

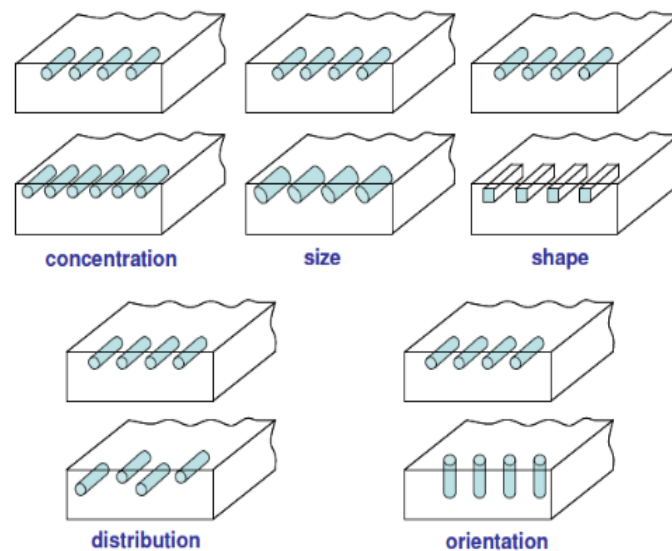
2.3 วัสดุเชิงประกอบ (composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีและสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติพิเศษกว่าวัสดุเดิม โดยวัสดุที่เป็นองค์ประกอบนั้นต้องไม่ละลายซึ่งกันและกัน องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบมีสองส่วน ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (matrix phase) และวัสดุส่วนที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักเรียกว่า เฟสกระจาย (disperse phase) หรือเฟสเสริมแรง (reinforced phase) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มวัสดุเสริมแรง ส่วนวัสดุเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์

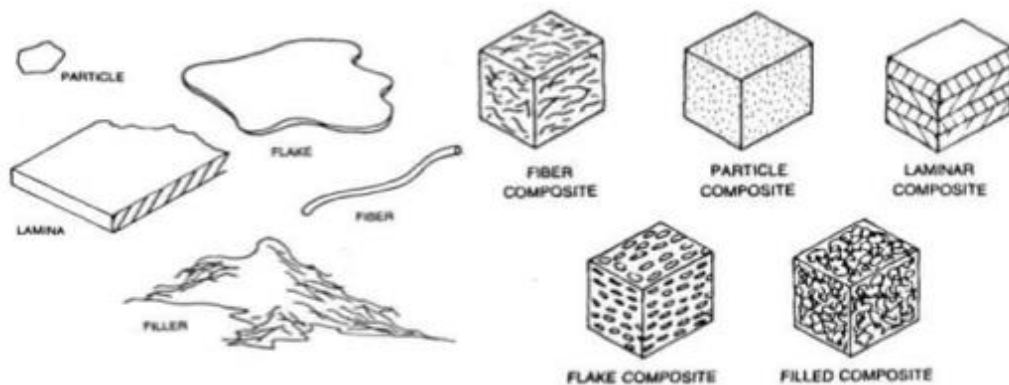
วัสดุเชิงประกอบมีวิวัฒนาการมาตั้งแต่อดีต ในยุคก่อนประวัติศาสตร์มนุษย์ประดิษฐ์ก้อนอิฐเพื่อใช้เป็นผนังกำบังภัย อิฐในสมัยนั้นเตรียมขึ้นจากฟางข้าวกับดินเหนียว นอกจากนี้ในธรรมชาติยังมีวัสดุเชิงประกอบมากมาย เช่น ไม้ ซึ่งประกอบด้วยลิกนินและเซลลูโลส [21] หรือกระดูกที่เป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแร่อะพาไทต์ (apatite) และคอลลาเจน (collagen)

2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบถูกผลิตขึ้นเพื่อให้มีสมบัติที่ดี และตอบสนองต่อการใช้งานเฉพาะทาง สมบัติของวัสดุเชิงประกอบนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุเริ่มต้น ทั้งอัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ไม่ว่าจะเป็น ขนาด รูปร่าง หรือการจัดเรียงตัว วัสดุเชิงประกอบจำแนกตามประเภทของเมทริกซ์ได้ 3 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (ceramic matrix composite, CMC) อีกทั้งยังสามารถจำแนกได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) และเกล็ด (whisker)



รูปที่ 2.14 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 2.15 ลักษณะของสารเสริมแรง

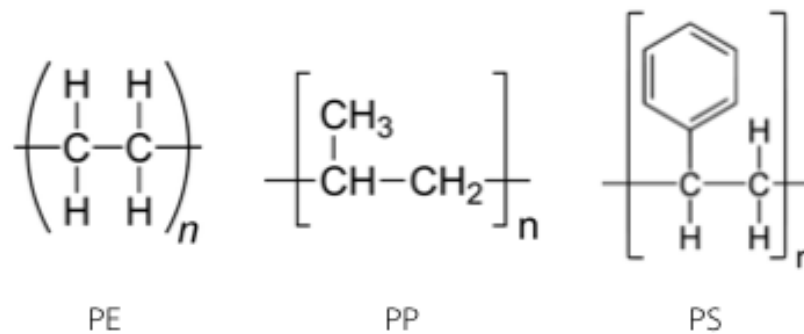
2.3.2 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยถูกผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการที่วัสดุธรรมชาติโดยทั่วไปทำไม่ได้ และทำให้วัสดุมีน้ำหนักเบาแต่ในขณะเดียวกันสามารถรับแรงได้ดี ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่ผลิตได้มีความแข็งแรงเทียบเท่าโลหะ และมีการพัฒนาวัสดุประเภทนี้สำหรับใช้ในงานด้านวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้นทั้งในอุตสาหกรรมเครื่องบิน เรือ รถยนต์ ยานอวกาศ ด้านการก่อสร้าง และการขนส่ง เป็นต้น

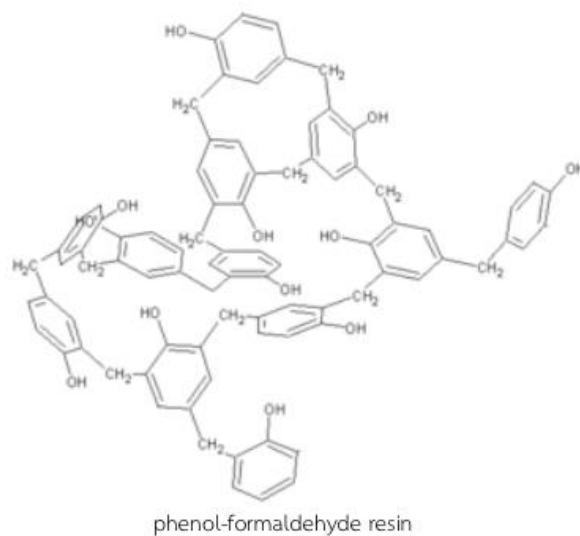
พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยซ้ำเรียงต่อกันเป็นสายยาวเรียกว่า มอนอเมอร์ (monomer) นิยมใช้เส้นใยเป็นตัวเสริมแรง เส้นใยทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรง โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงสุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย การเสริมแรงทำให้เมทริกซ์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่วัสดุจะยึดได้ไม่เกินระยะยึดของเส้นใย ดังนั้นพอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยไว้ไม่ให้เส้นใยหลุดออกจากเมทริกซ์ได้ง่าย สำหรับสารเสริมแรงเหตุผลที่นิยมใช้เส้นใยเพราะ สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีความสามารถในการเสริมแรงด้อยกว่า เนื่องจากอนุภาคเป็นเพียงผงเล็กๆที่มีความไม่ต่อเนื่องของสาร บางครั้งจึงเรียกสารเสริมแรงแบบอนุภาคว่าสารตัวเติม (filler)

สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีความต่อเนื่อง สามารถแบ่งย่อยได้ 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และ เทอร์โมเซต พอลิเมอร์สองประเภทนี้มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติก เป็นพอลิเมอร์ที่นำมารีไซเคิลได้ นั่นคือเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วครั้งหนึ่ง สามารถนำมาหลอมขึ้นรูปได้อีกตามต้องการ และแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง โมเลกุลของพอลิเมอร์จะยึดกันด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ (vander waals) เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) และพอลิเอไมด์ (polyamide) เป็นต้น แต่เทอร์โมเซต เป็นพอลิเมอร์ที่มีรูปทรงถาวร ไม่สามารถนำกลับมาหลอมและขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ใหม่ แต่จะเกิดการไหม้สลายเมื่อได้รับความร้อนสูงอีกครั้ง เนื่องจากพอลิเมอร์เกิดการคงรูปด้วยปฏิกิริยาการเชื่อมขวางกันระหว่างโมเลกุลกลายเป็นโครงสร้างร่างแหต่อกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent) ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้ เช่น ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (phenol-formaldehyde resin) พอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester) อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) และเมลามีน (melamine) เป็นต้น โดยเมทริกซ์มีหน้าที่หลักคือ เป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังเส้นใย

นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของเส้นใยเนื่องจากการขจัดหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติดระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยจึงควรมีค่าสูงพอเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นใยหลุดออกจากเมทริกซ์ได้ง่าย



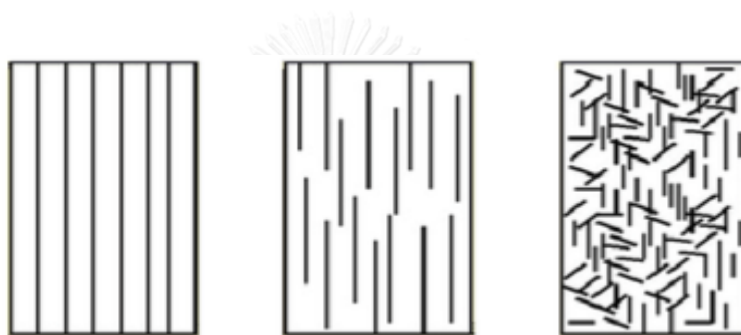
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต [22]

สำหรับสารเสริมแรงมีหลายชนิดอาจมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาคขนาดเล็ก หรือเส้นใยก็ได้ แต่นิยมใช้สารเสริมแรงในรูปเส้นใยกับเมทริกซ์พอลิเมอร์มากที่สุด เนื่องจากเส้นใยมีประสิทธิภาพในการรับแรงได้ดีกว่าสารเสริมแรงในรูปอนุภาค การจะนิยามวัสดุเสริมแรงว่าเป็นเส้นใยได้นั้นต้องคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio, L/D) เส้นใยเป็นวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กมาก หากพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ต้องมีค่ามากกว่า 100 ขึ้นไปจึงจะเรียกสารเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใย นอกจากนี้ ความยาวของเส้นใยถือ

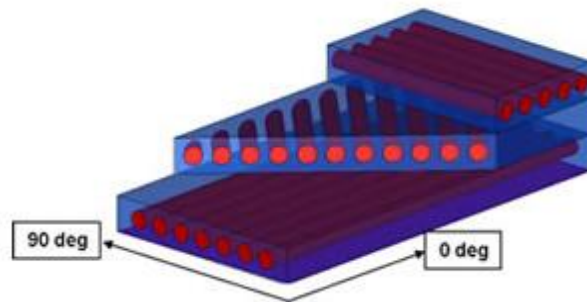
เป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความแข็งตึงของวัสดุเชิงประกอบ ความยาวของเส้นใยสามารถกำหนดได้ด้วยค่าๆหนึ่งที่เรียกว่า ความยาววิกฤต (critical fiber length, l_c) ค่านี้ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย ค่าความแข็งแรงสูงสุดของเส้นใย (ultimate strength) และค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย จากนั้นนำค่าเหล่านี้มาคำนวณจะได้ค่าความยาววิกฤตของเส้นใย โดยทั่วไปแล้ว ถ้าเส้นใยที่นำมาเสริมแรงมีความยาวมากกว่าความยาววิกฤต 15 เท่า จะเรียกเส้นใยนี้ว่าเส้นใยยาวหรือเส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) แต่หากเส้นใยที่ใช้เสริมแรงมีความยาวน้อยกว่าความยาววิกฤต จะเรียกว่าเส้นใยสั้นหรือเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) เส้นใยสามารถจำแนกประเภทตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยจากธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์



รูปที่ 2.18 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆในเมทริกซ์

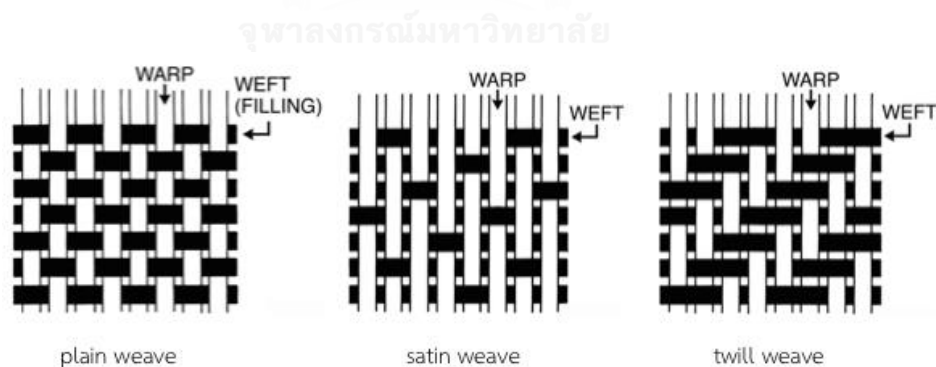
เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้มาจากพืช สัตว์ และแร่ธรรมชาติ เช่น เส้นใยเซลลูโลสที่ได้มาจากส่วนต่างๆของพืชจำพวก ป่าน ปอ ลินิน ฝ้าย และขน เป็นต้น เส้นใยโปรตีนที่ได้จากรังไหม และขนสัตว์ เป็นต้น แต่แร่ใยหินถึงแม้จะเป็นวัสดุติดุติจากธรรมชาติแต่เมื่อเสื่อมสภาพจะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้บริโภค ปัจจุบันจึงไม่ได้รับความนิยม สำหรับเส้นใยสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่มนุษย์ผลิตขึ้นจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อให้มีสมบัติที่ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยไนลอน เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยเคพลาร์ เป็นต้น การที่เส้นใยธรรมชาติได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อดีคือ ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงค่อนข้างสูง และเหตุผลหลักคือ เส้นใยธรรมชาติสามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ (biodegradability) สมบัติในการเสริมแรงนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใย การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และที่สำคัญคือ ทิศทางของการเสริมแรง โดยเส้นใยจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้มากที่สุดในทิศทางขนานกับเส้นใย และต่ำสุดในทิศที่แรงกระทำตั้งฉากกับเส้นใย [23] ดังนั้นถ้าต้องการให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงในทุกทิศทางจึงควรใช้เส้นใย

เสริมแรงทุกทิศทาง ผ้าทอจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ [24]



รูปที่ 2.19 ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย (multidirectional)

ผ้าทอ คือ ผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นด้ายสองชุดหรือมากกว่า ขัดสานในลักษณะตั้งฉากกันด้วยเครื่องทอผ้า เส้นด้ายที่ขนานตามความยาวของผืนผ้า เรียกว่า เส้นด้ายยืน (warp) เส้นด้ายอีกชุดหนึ่งที่ขนานตามแนวหน้ากว้างของผืนผ้า เรียกว่า เส้นด้ายพุ่ง (weft) การทอเส้นด้ายอาจขัดกันแบบเส้นต่อเส้น หรือเป็นกลุ่มเส้นด้ายขัดกันก็ได้ สำหรับลวดลายของผ้าทอ มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานมีผลทั้งในด้านของความสวยงามและความแข็งแรง ตัวอย่างของโครงสร้างลายผ้าได้แก่ ผ้าทอลายขัด (plain weave) ผ้าทอลายแยง (twill weave) และผ้าทอลายต่วน (satin weave) ซึ่งผ้าทอลายขัดนิยมใช้มากที่สุดเนื่องจาก ลายขัดมีโครงสร้างการทอที่หนาแน่น และทนต่อแรงดึงสูง [24]



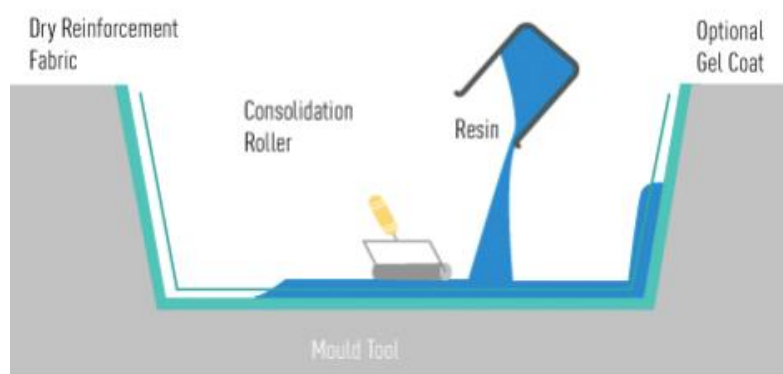
รูปที่ 2.20 โครงสร้างลายผ้าทอ

2.4 กรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย

กระบวนการสำหรับขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบนั้นสามารถผลิตได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป [25] ตัวอย่างเทคนิคการผลิตวัสดุเชิงประกอบมีดังนี้

2.4.1 การขึ้นรูปโดยใช้มือทา (hand lay-up)

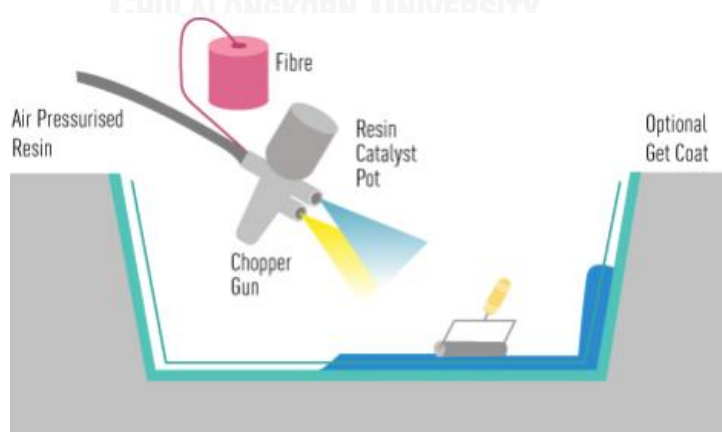
เป็นวิธีการผลิตที่ง่ายที่สุด ลงทุนน้อย อุปกรณ์หาได้ง่าย และนิยมใช้มากที่สุดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การขึ้นรูปแบบเปียก (wet lay-up) วิธีการคือ ใส่เส้นใยหรือผ้าทอที่จะใช้ในการเสริมแรงลงในแม่แบบ จากนั้นเทเรซินลงไปและใช้ลูกกลิ้งช่วยในการรีดไล่ฟองอากาศ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้บุคคลที่มีความชำนาญจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอในทุกชิ้นงาน



รูปที่ 2.21 การขึ้นรูปโดยใช้มือทา

2.4.2 การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องพ่น (spray lay-up)

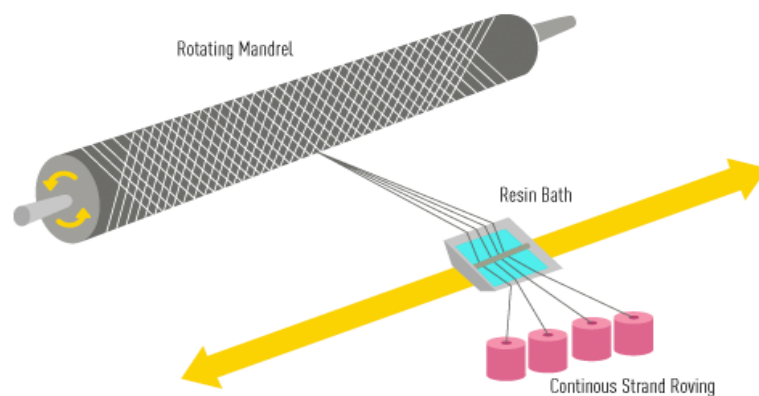
เป็นวิธีการผลิตที่พัฒนามาจากวิธีการทำด้วยมือ มีข้อดีคือ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังผลิตได้ครั้งละจำนวนมากๆ



รูปที่ 2.22 การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องพ่น

2.4.3 การขึ้นรูปโดยการพันเส้นใย (filament winding)

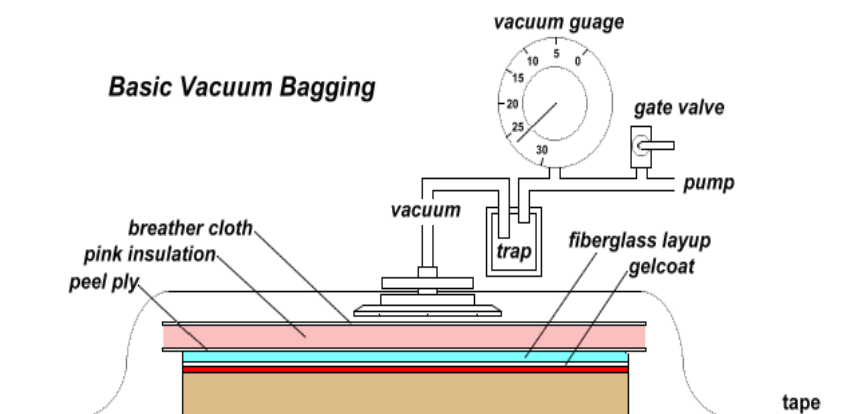
วิธีการผลิตนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงภายใน เช่น ท่อหรือถังเก็บสารเคมี โดยชิ้นงานที่ผลิตขึ้นจะมีสมบัติเด่นในด้านการทนต่อแรงดัน เทคนิคนี้จะใช้เส้นใยยาวที่เคลือบด้วยเรซิน พันลงบนแม่แบบที่หมุนอยู่ สามารถกำหนดทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยได้ เมื่อได้ชิ้นงานที่มีความหนาตามต้องการแล้วให้นำชิ้นงานไปอบเพื่อให้เรซินแข็งตัว ชิ้นงานที่ได้จะมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง



รูปที่ 2.23 การขึ้นรูปโดยใช้การพันเส้นใย

2.4.4 การขึ้นรูปโดยใช้ถุงสุญญากาศ (vacuum bagging)

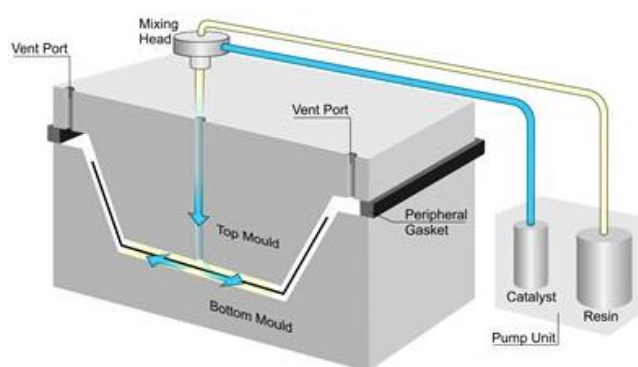
วิธีนี้มีลักษณะคล้ายกับเทคนิคการใช้มือทา เป็นการผลิตในระบบปิดที่ง่ายที่สุด โดยวางเส้นใยหรือแผ่นผ้าทอลงในแม่แบบจากนั้นทาเรซินทับลงไป วางถุงสุญญากาศคลุมชิ้นงาน แล้วดูดเอาอากาศภายในแม่แบบออก ความดันภายนอกจะส่งผลให้ถุงสุญญากาศแนบกับผิวชิ้นงานได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบ



รูปที่ 2.24 การขึ้นรูปโดยใช้ถุงสุญญากาศ

2.4.5 การขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบอัด (resin transfer moulding, RTM)

วิธีนี้จะได้ชิ้นงานที่มีขนาดมาตรฐานเดียวกัน ขั้นตอนคือวางเส้นใยในแม่แบบ จากนั้นฉีดเรซินเข้าไปในแม่แบบ เรซินจะไหลไปทั่วชิ้นงาน แต่ต้องระวังในขั้นตอนการฉีดเรซินเนื่องจากอาจทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงาน ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีรูปแบบและความหนาของชิ้นงานที่แน่นอน



รูปที่ 2.25 การขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบอัด

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Annadurai และคณะ [26] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของเส้นใยไหมหลากหลายสายพันธุ์ ทั้งจีน อินเดีย และญี่ปุ่น พบว่าเส้นใยไหมที่ทำการศึกษาทั้งหมดมีปริมาณผลึกสูงจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน มีความทนทานต่อแรงดึงอยู่ในช่วงประมาณ 65-200 เมกะปาสกาล และสามารถยืดก่อนขาดได้ในช่วงประมาณ 20-40 เปอร์เซ็นต์ โดยความทนแรงดึงของเส้นใยไหมเป็นผลมาจากโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก

Zulkifli และคณะ [27] ได้ศึกษาความทนทานการแตกหักภายในของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยผ้าไหมทอ ที่มีจำนวนชั้นของผ้าไหม 8 10 12 และ 14 ชั้น ด้วยวิธีการการอัดขึ้นรูป (compression molding) ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการให้แรงที่ 1 (mode I) เพื่อทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก โดยแรงที่มากระทำจะตั้งฉากกับผิวหน้าของรอยร้าวซึ่งทำให้ผิวหน้าของรอยร้าวเปิดแยกออกจากกัน พบว่าค่าความทนทานการแตกหักภายในของวัสดุ (interlaminar fracture toughness, G_{IC}) เพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของไหมที่เพิ่มขึ้น

Craven และคณะ [28] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นใยไหมและอีพ็อกซีด้วยวิธี Microbond test โดยใช้การทดสอบการดึงเส้นใยเดี่ยว พบว่าความแข็งแรงเฉือนระหว่างพื้นผิว (interfacial shear strength) ของเส้นใยไหมและอีพ็อกซีมีค่า 15 เมกะปาสกาล

แสดงให้เห็นว่าเส้นใยไหมสามารถนำไปเสริมแรงได้ดีในอีพ็อกซีประกอบกับเส้นใยไหมมีความทนแรงดึงสูงและความสามารถในการยืด (extensibility) สูง

Ramesh และคณะ [29] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและเส้นใยลินิน ซึ่งงานตัวอย่างเตรียมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปโดยมีปริมาณของเส้นใยทั้งสองชนิดผสมกัน 30 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าที่ปริมาณเส้นใย 40 เปอร์เซ็นต์ (เส้นใยไหม 20 เปอร์เซ็นต์ และเส้นใยลินิน 20 เปอร์เซ็นต์) มีค่าความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งสูงสุด แสดงให้เห็นว่ายังมีปริมาณเส้นใยในการเสริมแรงมาก วัสดุเชิงประกอบก็จะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

Ude และคณะ [30] ได้ศึกษาการตอบสนองต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมทอ ซึ่งงานทดสอบเตรียมจากผ้าทอในปริมาณ 10 15 20 25 และ 30 ชั้น ขึ้นรูปด้วยวิธีการทำด้วยมือ ซึ่งจำนวนชั้นที่มากขึ้นเปรียบเสมือนความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุแบบน้ำหนักตกกระทบ (drop weight impact test) พบว่าความทนแรงกระแทก และการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนไหมมากขึ้น แสดงว่าปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นช่วยในการรับและกระจายแรง และจากการศึกษาสัมมนาวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกในทุกสัดส่วนของผ้าไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นลักษณะผิวยรอยแตกของอีพ็อกซี (cracking) การแยกตัวระหว่างชั้นของชิ้นงานทดสอบ (delamination) และลักษณะความเสียหายของเส้นใยหลังได้รับแรง ทั้งการหักของเส้นใย (fiber breakage) และเส้นใยที่หลุดออกจากเนื้ออีพ็อกซี (fiber pull-out) แสดงผิวที่เรียบ ซึ่งมีลักษณะไม่ต่างกันในทุกอัตราส่วน

Ariffin และคณะ [31] ได้ศึกษาความเสียหายจากแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมที่มีโครงสร้างแบบแผ่น (face-sheet) และแบบแซนด์วิช (sandwich) ซึ่งมีน้ำหนักเบา โดยมีคอร์ (core) เป็นโฟม (foam) คอร์แมท (coremat) และ ฮันนี่คอมป์ (honeycomb) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการทำด้วยมือ จากนั้นทดสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงานแบบน้ำหนักตกกระทบภายใต้พลังงานการกระแทก 32 48 และ 60 จูล แล้วศึกษาความสามารถในการรับแรง การดูดซับพลังงาน และลักษณะความเสียหายของชิ้นงาน จากการทดสอบพบว่าสามารถสังเกตเห็นการเสียรูปร่างเด่นชัดในชิ้นงานที่มีโครงสร้างเป็นแผ่น การดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่มีคอร์เป็นโฟมแสดงประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานดีกว่าแบบอื่น ส่วนชิ้นงานที่มีคอร์แบบคอร์แมทมีความสามารถในการรับน้ำหนักดีกว่า และชิ้นงานจะมีพื้นที่ในการแยกตัวของชิ้นงานมากขึ้นตามแรงที่ได้รับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าพลังงานถูกดูดซับผ่านการก่อรูปแบบของความเสียหาย

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

1. อีพ็อกซีเรซิน (EP-085) จากบริษัท Concrete Composite Trading Co., Ltd. แสดงสมบัติในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สมบัติของอีพ็อกซีเรซินและตัวทำแข็ง

Property	Unit	Resin EP-0885	Hardener HP-085
Appearance	-	Clear liquid	Clear liquid
Color	-	Max 2	Max 4
Specific gravity at 25°C	-	1.2	1.0
Viscosity at 25°C	cPs	1200	150
Mixing ratio	Pbw	100	35
Pot life of 100 gms mix at 25°C	Minutes	30	30
Gel time at 25°C	Minutes	35	35
1 mm thick film gel time at 20-25°C	Hrs	6	6
Curing shrinkage	%	1.5	1.5
Glass transition temperature			
25°C / 8 days	°C	65±5	65±5
24 hrs / 25°C + 4 hrs / 80°C	°C	85±5	85±5

2. ตัวทำแข็ง (HP-085) จากบริษัท Concrete Composite Trading Co., Ltd. แสดงสมบัติในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของอีพ็อกซีที่ผ่านการบ่ม

Property	Test method	Unit	Typical value
Tensile stress	ISO 527	MPa	60
Elongation	ISO 527	%	4-6
Tensile modulus	ISO 527	GPa	2850
Flexural stress	ISO 178	MPa	110
Flexural modulus	ISO 178	MPa	2950
Compression strength	ISO 604	MPa	120
Shore hardness D	ISO 868	-	80
Heat distortion temperature (HDT)	ISO 75	°C	75-85

3. ผ้าไหมทอ (silk fabric) จากกลุ่มผ้าไหมชุมชนบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี น้ำหนัก 62.50 กรัม/ตารางเมตร

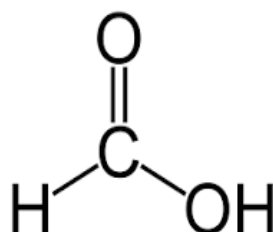


รูปที่ 3.1 ผ้าไหมทอ

4. กรดฟอร์มิก (formic acid) เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท ฟาโคบิส จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติของกรดฟอร์มิก

Property	Unit	Typical value
IUPAC name	-	Methanoic acid
Chemical formula	-	CH ₂ O ₂
Molar mass	g/mol	46.03
Appearance	-	colorless fuming liquid
Odor	-	pungent, penetrating
Density	g/ml	1.220
Melting point	°C	8.4
Boiling point	°C	100.8
Vapor pressure at 20°C	mmHg	35
Acidity (pK _a)	-	3.77
Viscosity at 26°C	cP	1.57

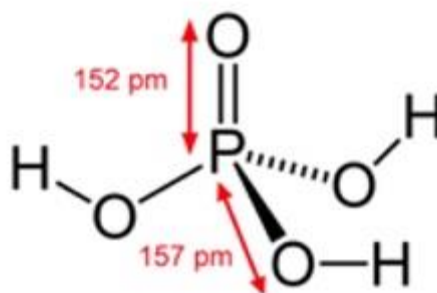


รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟอร์มิก

5. กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) ความเข้มข้นร้อยละ 85 จากบริษัท ฟาโคบิส จำกัด

ตารางที่ 3.4 สมบัติของกรดฟอสฟอริก

Property	Unit	Typical value
IUPAC name	-	trihydroxidooxidophosphorus
Chemical formula	-	H ₃ PO ₄
Appearance	-	white solid or colourless
Odor	-	odorless
Density	g/ml	1.685 (85% solution)
Melting point	°C	42.35 (anhydrous)
Boiling point	°C	158
Vapor pressure at 20°C	mmHg	0.03
Acidity (pK _a)	-	pK _{a1} = 2.148 pK _{a2} = 7.198 pK _{a3} = 12.319
Viscosity	cP	2.4–9.4 (85% aq. soln.)



รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟอสฟอริก

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ปีกเกอร์ (beaker)
2. แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)
3. ถาดแก้ว
4. คีมคีบ (forceps)
5. ตู้อุดควัน
6. กระดาษวัดค่า pH (pH indicator strips)
7. แก้วพลาสติก
8. ไม้พายคนสาร
9. แม่แบบสำหรับขึ้นรูป
10. พิล์มไมลาร์ (mylar film)
11. ลูกกลิ้ง
12. แปรงทาเรซิน
13. ตู้ออบสารเคมี ยี่ห้อ Memmert รุ่น D-91107
14. เครื่องกัด ซีเอ็นซี (CNC milling machine)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (x-ray diffractometer, XRD) รุ่น X8 APEX ของบริษัท Bruker (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) รุ่น Nicolet 6700 ของบริษัท Thermo Scientific (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6400L ของบริษัท JEOL (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น LLOYD LR100 K (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น GT-7045-MD ของบริษัท GOTECH (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine) รุ่น LLOYD 500 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

7. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท METTLER TOLEDO รุ่น DSC 1 STAR^e System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
8. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851^e

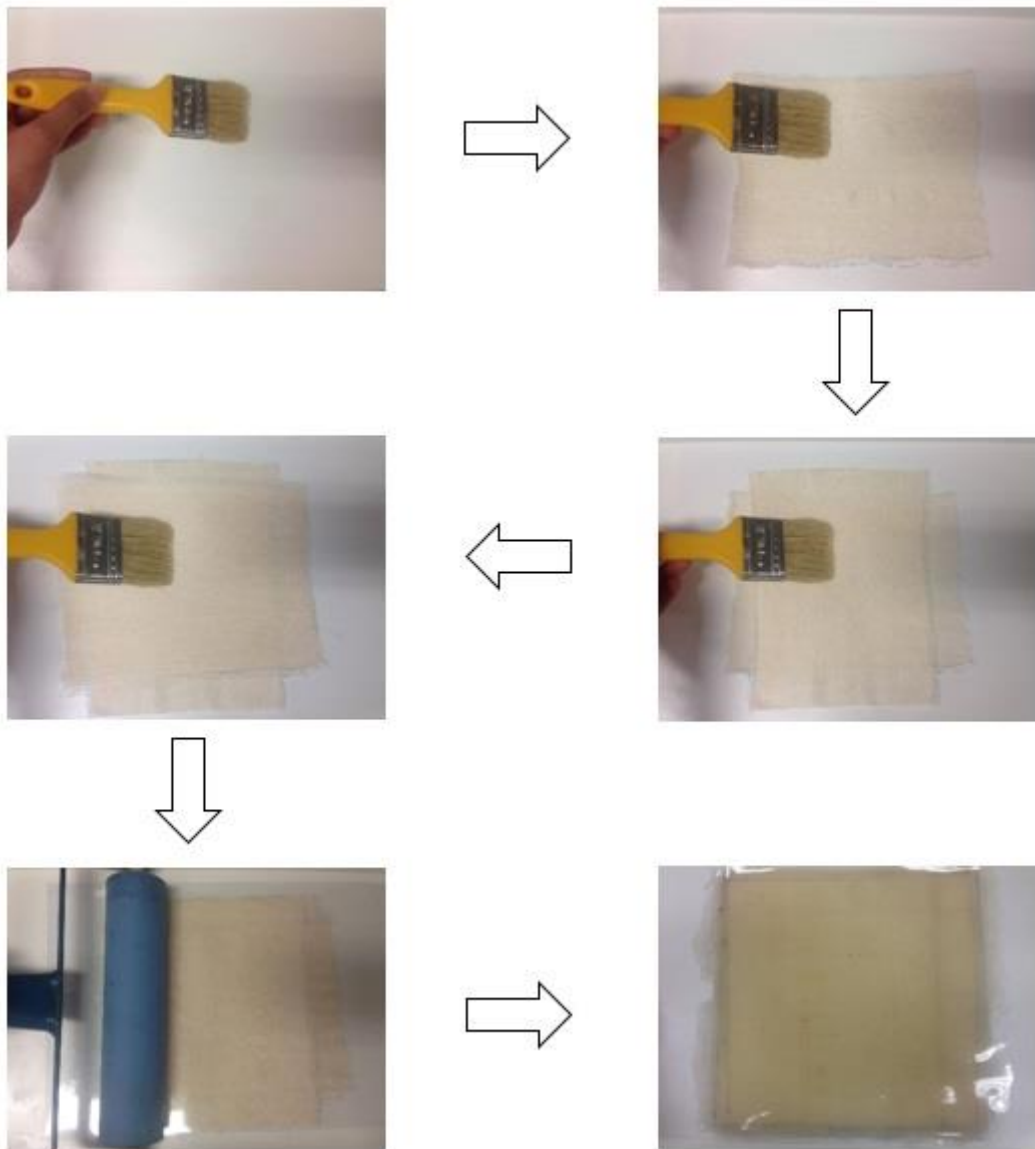
3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมผ้าไหม

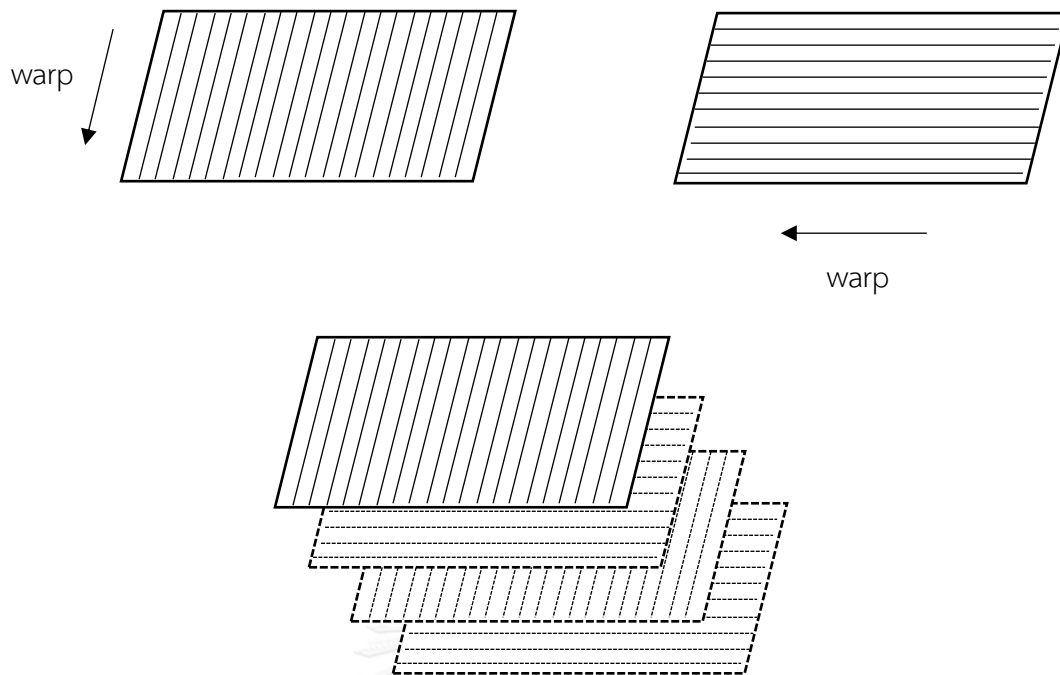
นำผ้าไหมขนาด 20x20 เซนติเมตร มาแช่ในกรดกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อชิ้นงาน ตามลำดับ โดยไม่มีแรงขึงตั้งทุกทิศทาง และแช่ในกรดกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 2, 4 และ 6 นาที ต่อชิ้นงานโดยไม่มีแรงขึงตั้งทุกทิศทาง ทำให้ผ้าไหมหดตัวอย่างรวดเร็ว จึงต้องทำการล้างกรดออกจากผ้าไหมที่ผ่านการแช่กรดทันทีด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด แล้ววางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.4.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

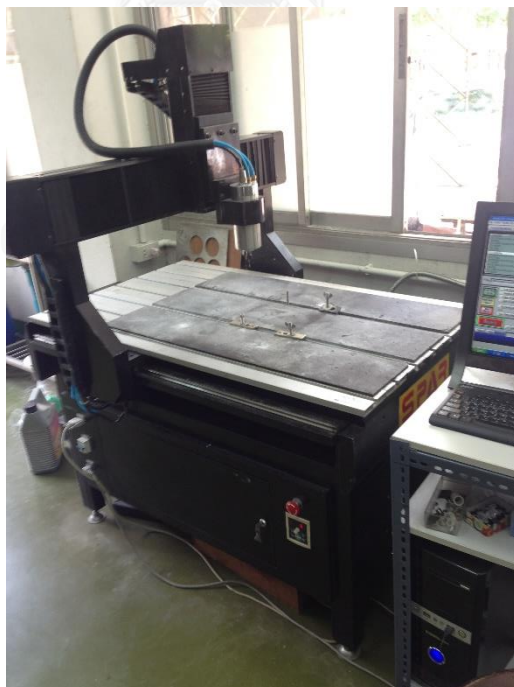
เตรียมอีพ็อกซีเรซินโดยการผสมอีพ็อกซีกับตัวทำแข็งในอัตราส่วน 100:35 โดยน้ำหนัก คนจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการทำด้วยมือดังนี้ ทาอีพ็อกซีเรซินลงบนผ้าไหม แล้วรีดไล่ฟองด้วยลูกกลิ้ง วางผ้าไหมชั้นที่สองในแนวตั้งฉากกับผ้าฝืนแรกลงบนผ้าไหมชั้นที่ 1 แล้วทาอีพ็อกซีเรซินทับลงไป ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนได้จำนวนชั้นของผ้าไหมตามต้องการ จากนั้นนำฟิล์มไมลาร์มาวางลงบนชิ้นงานและรีดไล่ฟอง เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าเรียบ ปลอบให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน CNC ในการทดลองนี้ทำการศึกษาน้ำหนักของผ้าไหม 3 สูตรดังนี้ สูตร 1 (จำนวน 2 ชั้น) สูตร 2 (จำนวน 4 ชั้น) และสูตร 3 (จำนวน 6 ชั้น)



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยผ้าไหม



รูปที่ 3.5 ทิศทางการวางผ้าไหมเพื่อเสริมแรง



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดชิ้นงาน CNC

3.5 การวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงาน

3.5.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกและกรดฟอสฟอริก เปรียบเทียบกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยการสังเกตมุมการหักเหของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนแปลง ทดสอบในช่วง $2\theta = 4^\circ - 40^\circ$ อัตราเร็วในการทดสอบ $2.4^\circ/\text{min}$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์

3.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มสเปกโทรสโกปี (FTIR)

วิเคราะห์และเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ กับผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกและกรดฟอสฟอริก ในช่วงความยาวคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ บริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

3.5.3 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตรวจสอบพื้นผิวของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกและกรดฟอสฟอริก และตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอียิปทอกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก โดยทำการเคลือบทองบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนตรวจสอบ และใช้ศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ 5 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.5.4 ทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine)

ทดสอบความทนแรงดึงของผ้าไหมตามมาตรฐาน ASTM D5034 ทั้งในแนวเส้นพุ่ง (weft) และแนวเส้นยืน (warp) โดยมีระยะดึง (gauge length) 75 มิลลิเมตร ใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่ 300 มิลลิเมตร/นาที ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) และการยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

3.5.5 ทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine)

ทดสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $63.5 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร และบากชิ้นงานเป็นรูปตัววี (V-notch) ด้วยเครื่องบากชิ้นงาน จากนั้นทดสอบภายใต้สภาวะที่มีน้ำหนักร้อน 2.75 จูล และความเร็วก้อนเหวี่ยง 3.46 เมตร/วินาที



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

3.5.6 ทดสอบความทนแรงดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine)

ทดสอบความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมแบบแรงกระทำสามจุด (three-point bending) ตามมาตรฐาน ASTM D790 มีขนาดชิ้นงาน 127 × 12.7 × 3.2 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 50 มิลลิเมตร ขนาด load cell 2500 นิวตัน และอัตราเร็วในการทดสอบ 1.4 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

3.5.7 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

วิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม โดยตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนักประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ใส่ในแพนอลูมิเนียม แล้วปิดฝานี้ก ใช้สภาวะทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 300 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.13 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5.8 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม โดยใช้สภาวะทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน อัตราการไหลของก๊าซ 25 มิลลิเมตร/นาที ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 850 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนัภายใต้ความร้อน



บทที่ 4

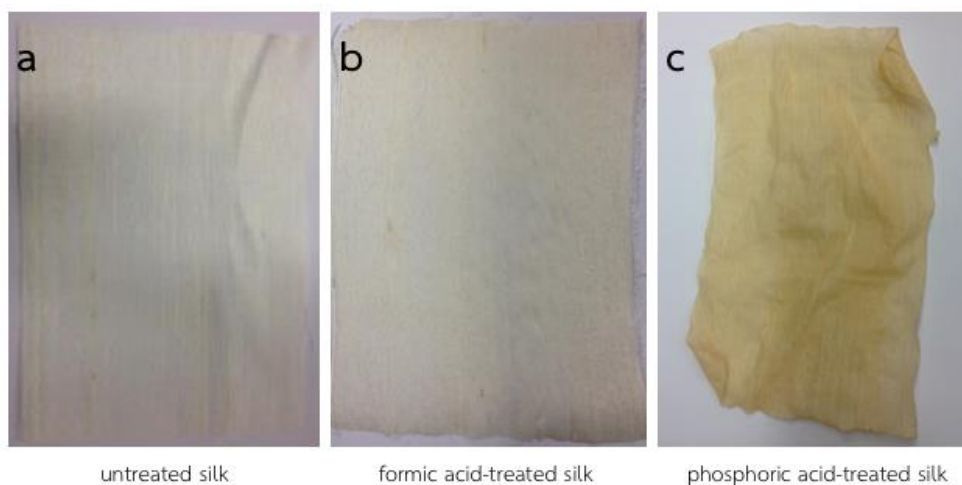
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเปราะของอีพ็อกซี และเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีที่มีสมบัติความทนแรงกระแทกดีขึ้นโดยการเสริมแรงด้วยผ้าไหม และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความเข้ากันได้ระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นไหม จึงทำการลดขนาดของเส้นไหมลง โดยนำผ้าไหมมาแช่ในกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ้าไหมอีกชุดหนึ่งแช่ในกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 2, 4 และ 6 นาที เพื่อปรับสภาพพื้นผิวของผ้าไหมให้ขรุขระและเข้ากันได้กับอีพ็อกซีมากยิ่งขึ้น โดยเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ จากนั้นนำผ้าไหมกับอีพ็อกซีมาขึ้นรูปด้วยวิธีการทำด้วยมือ โดยการวางผ้าไหมแต่ละชั้นในทิศทางตั้งฉากกัน ศึกษาผลของปริมาณผ้าไหมที่ใช้ในการเสริมแรง และผลของความแตกต่างระหว่างการใช้ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกที่มีต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี

4.1 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของผ้าไหม

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก และผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก โดยรูปที่ 4.1a คือผ้าไหมดิบที่ได้มาจากโรงงานยังไม่ได้ทำการปรับสภาพ ผ้าไหมมีสีเหลืองนวล มีความมันเงา เส้นไหมมีความหยาบเล็กน้อย และไม่ค่อยยืดหยุ่น ในขณะที่รูป 4.1b คือผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก มีความมันเงาลดลง สีของเส้นไหมอ่อนลง ผ้าไหมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และยังคงมีลักษณะเหมือนผ้าไหมก่อนปรับสภาพ แต่เมื่อนำผ้าไหมมาทำการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก (รูปที่ 4.1c) พบว่าผ้าไหมในสูตรนี้มีความเปราะ ขาดง่าย ผิวไม่เรียบ และสูญเสียสภาพความเป็นผ้า เนื่องจากเส้นไหมมีการบวมตัว และผลจากการบวมตัวทำให้ผิวของเส้นไหมเกิดการยึดติดกันทำให้พื้นผิวของเส้นไหมลดลง เนื่องจากกรดฟอสฟอริกมีความสามารถในการละลายไหมได้ จึงทำให้โมเลกุลโปรตีนสูญเสียความเป็นผลึกเบต้าชีต (β -sheet) และโมเลกุลโปรตีนเกิดการขาดตัว ซึ่งจะปรากฏให้เห็นในลักษณะพื้นผิวผ้าไหมที่ขรุขระ (roughness) ยับยึกยงอ (wrinkle) และสูญเสียความเงามัน (gloss)



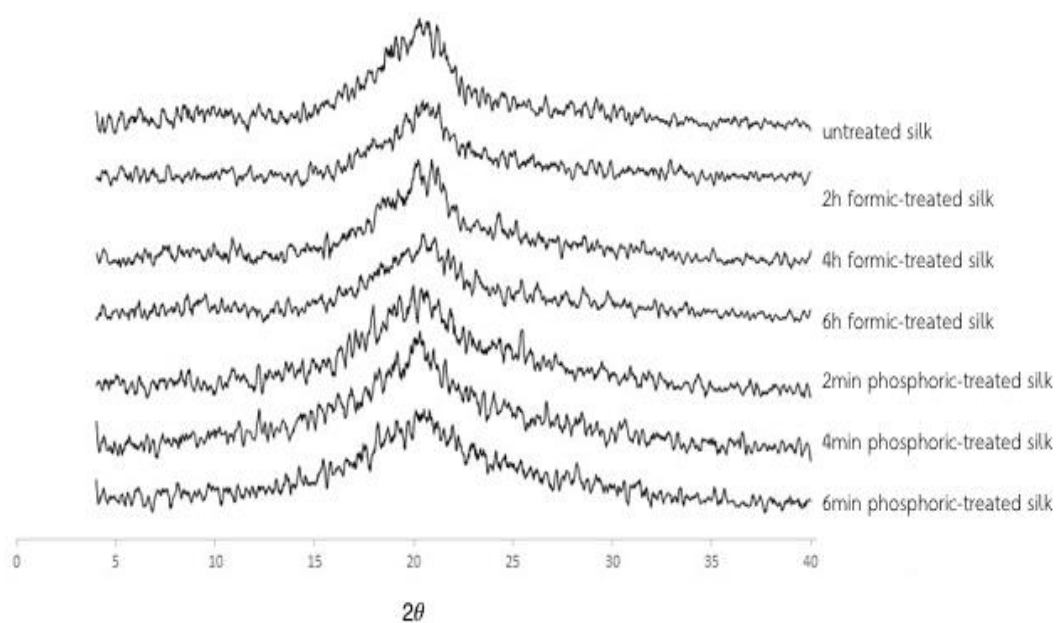
รูปที่ 4.1 ลักษณะชิ้นงาน (a) ผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (b) ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก และ (c) ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก

4.1.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผ้าไหมด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกของผ้าไหมที่ $2\theta = 4^\circ - 40^\circ$ พบว่าผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกในเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกในเวลา 2, 4 และ 6 นาที ให้ผลจากการทดสอบในทำนองเดียวกันคือ ปรากฏพีกบอร์ด (broad peak) ที่ประมาณ $2\theta = 20.2^\circ$ [32, 33] มีรูปร่างของพีก และความเข้มพีก ในลักษณะเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกและกรดฟอสฟอริก ยังคงมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และจากการคำนวณปริมาณผลึกของผ้าไหมในตารางที่ 4.1 พบว่าผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีปริมาณผลึกใกล้เคียงกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ในขณะที่ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกมีความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากกรดฟอสฟอริกทำให้เส้นไหมเกิดการบวมตัว ส่งผลให้ความเป็นระเบียบของผลึกแบบ β -sheet ลดลง

ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลึกของผ้าไหมที่คำนวณจากเทคนิค XRD

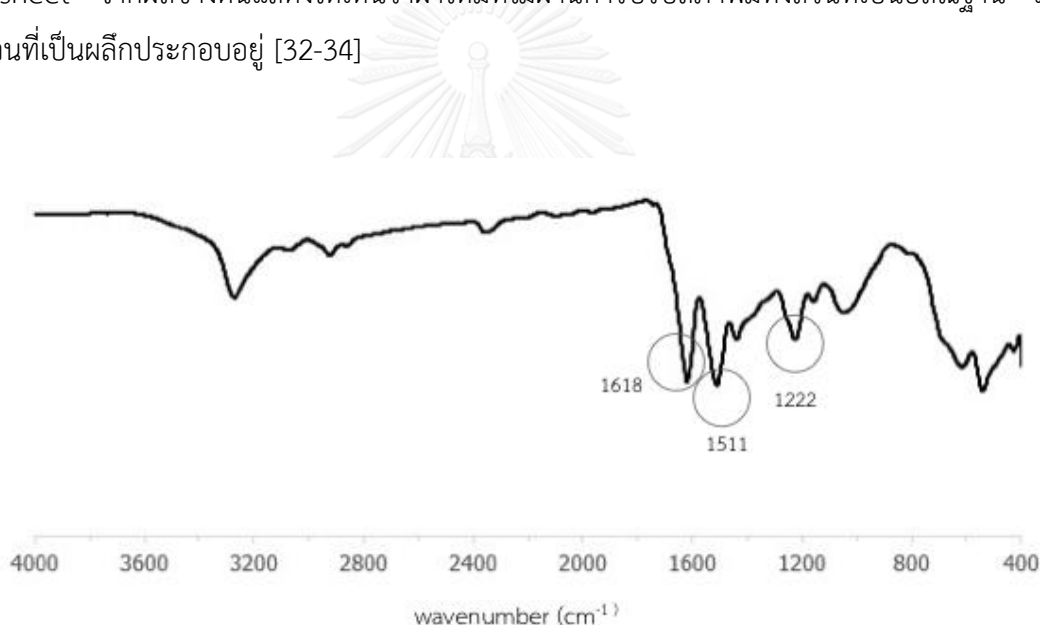
samples	% crystallinity
untreated silk	31.4
2h formic-treated silk	31.1
4h formic-treated silk	31.0
6h formic-treated silk	30.7
2min phosphoric-treated silk	27.2
4min phosphoric-treated silk	26.7
6min phosphoric-treated silk	24.6



รูปที่ 4.2 X-ray diffractograms ของผ้าไหมที่สภาวะต่างๆ

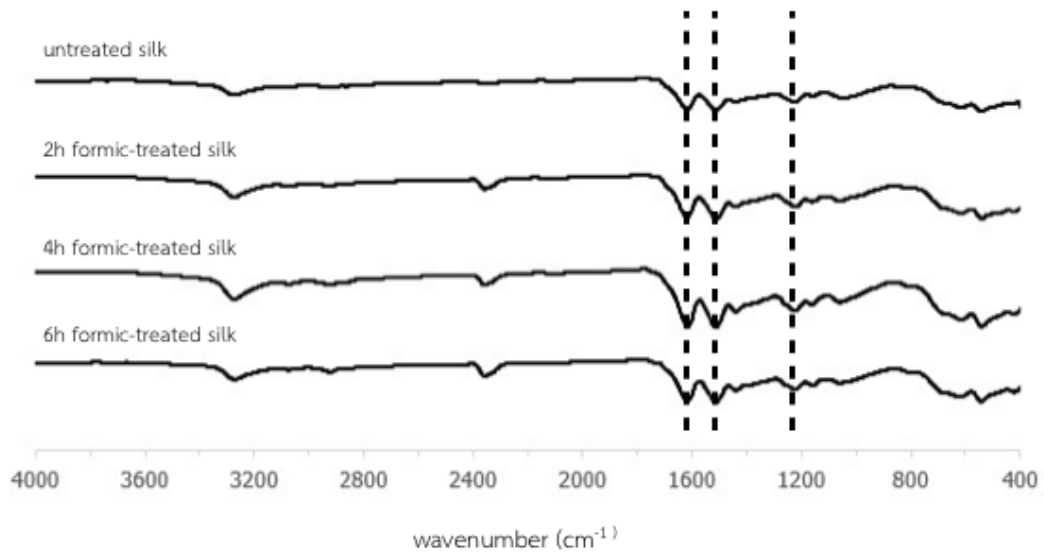
4.1.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าไหมด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มสเปกโทรสโกปี (FTIR)

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผ้าไหมด้วยเทคนิค FTIR เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกในผ้าไหม หลังจากผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกและกรดฟอสฟอริก ในรูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพแสดงพีคการยืดของพันธะ N-H ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของผ้าไหมดังนี้ ที่เลขคลื่น 1618 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของ amide I ที่มีโครงสร้างแบบ α -helix ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่เป็นเฟสอสัณฐาน (amorphous) หรือส่วนที่ไม่เป็นผลึกในผ้าไหม อีกทั้งพบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ amide II ที่เลขคลื่น 1511 cm^{-1} เกิดจากโครงสร้างผลึกแบบ β -sheet ของไหม และพบ amide III ปรากฏที่เลขคลื่น 1222 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการรวมกันของโครงสร้างแบบ α -helix และ β -sheet จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐาน และส่วนที่เป็นผลึกประกอบอยู่ [32-34]



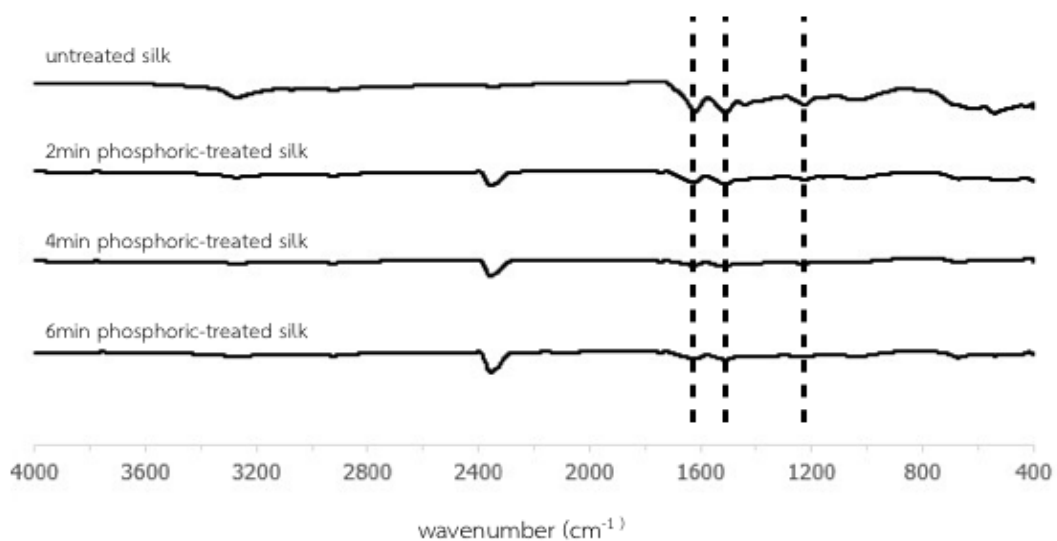
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

โครงสร้างผลึกแบบ β -sheet เกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลต่อความแข็งแรงของผ้าไหม กล่าวคือถ้าผ้าไหมมีโครงสร้างผลึกมาก ก็จะมีแข็งแรงมาก ในรูปที่ 4.4 นี้แสดงให้เห็นว่า ภายหลังจากการปรับสภาพผ้าไหมด้วยกรดฟอร์มิก ยังคงปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชัน amide I, amide II และ amide III ที่ตำแหน่งเดิม แสดงว่ากรดฟอร์มิกเกิดการกัดเพียงบริเวณพื้นผิวของเส้นไหม โดยไม่ทำให้โครงสร้างของไหมเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก

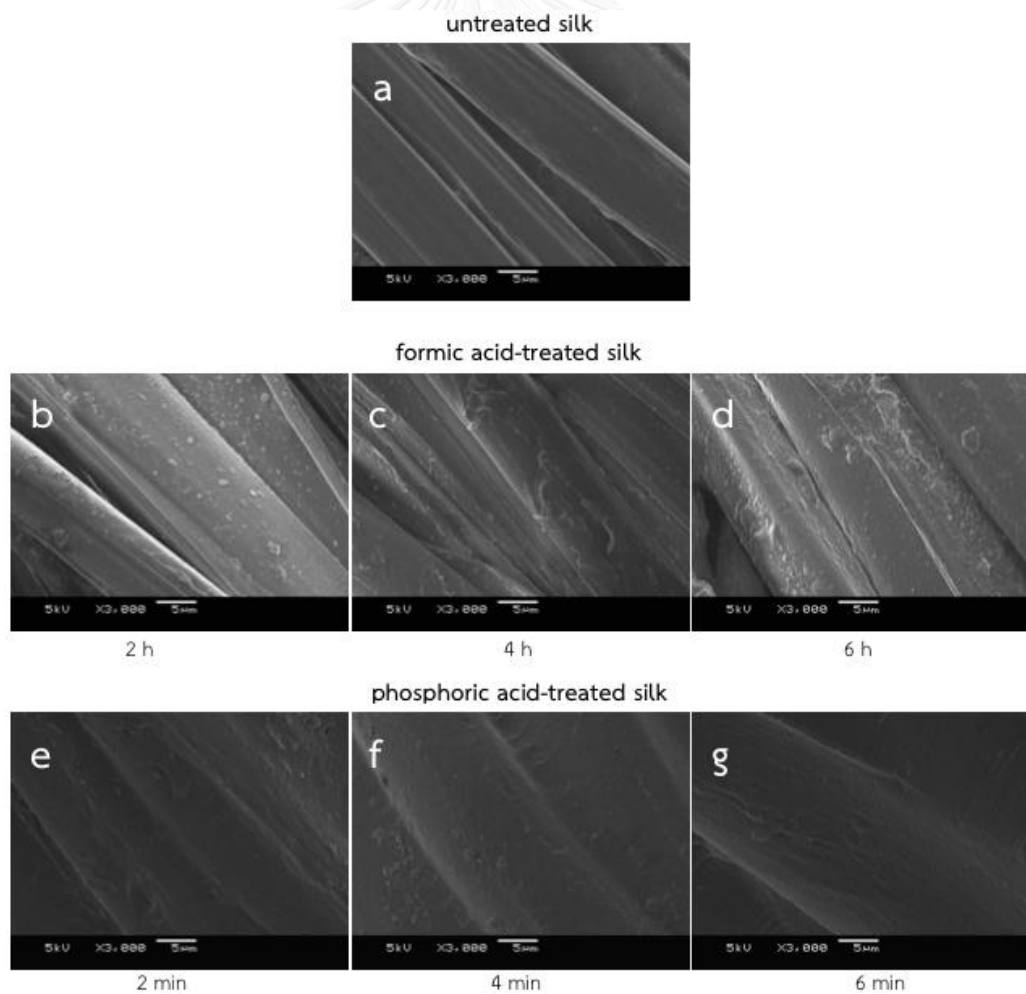
ในขณะที่ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกแสดงพีคของหมู่ฟังก์ชันต่างๆในตำแหน่งเดิม แต่เห็นได้ชัดว่ามีพื้นที่บริเวณใต้พีคน้อยลง หมายความว่าผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกมีความเข้มข้นของการดัดกลืนรังสีอินฟราเรดน้อยลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าผ้าไหมสูตรนี้มีหมู่ฟังก์ชันของ amide I, amide II และ amide III น้อยลง เนื่องจากกรดฟอสฟอริกเป็นกรดแก่จึงมีความรุนแรงมาก เส้นไหมจึงเกิดการบวมตัว ส่งผลให้โครงสร้างที่เป็นระเบียบของผลึก β -sheet เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก

4.1.4 ศึกษาสัณฐานวิทยาของผ้าไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพแสดงสัณฐานวิทยาบริเวณผิวหน้าของผ้าไหมในรูปที่ 4.6a แสดงพื้นผิวของไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นไหมมีผิวที่เรียบ แต่ภายหลังการปรับสภาพผ้าไหมด้วยกรดฟอร์มิก พื้นผิวของเส้นไหมมีความขรุขระมากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.6b-4.6d อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก ผิวหน้าของเส้นไหมมีความขรุขระมากกว่าการใช้กรดฟอร์มิก จากรูปที่ 4.6e-4.6g เห็นได้ชัดว่าเส้นไหมเกิดการบวมตัว ส่งผลให้เส้นไหมที่อยู่ใกล้กันเกิดการผสมกันเข้าด้วยกันจนเกือบจะกลายเป็นเส้นเดียวกัน และสูญเสียการจัดเรียงตัวของผลึกตามแนว anisotropic ด้วยความรุนแรงของกรดฟอสฟอริกส่งผลให้โมเลกุลบางส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงจนสูญเสียสภาพความเป็นผ้า และเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นชิ้นงานที่มีความเปราะแตกหักง่าย และมีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของผ้าไหม

4.1.5 ทดสอบความทนแรงดึงของผ้าไหม (tensile properties)

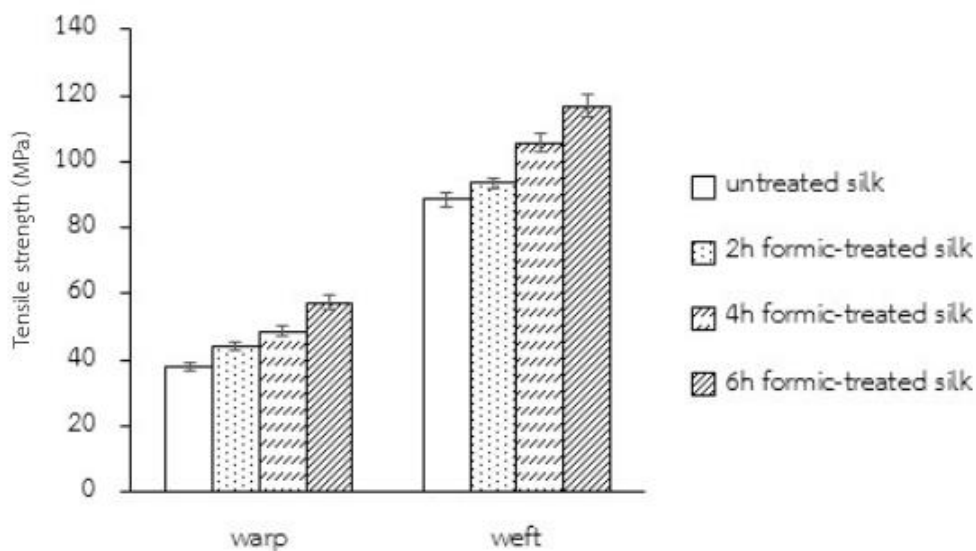
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดึงของผ้าไหมในรูปของความทนแรงดึง (tensile strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ทั้งในแนวเส้นด้ายยืน (warp) และแนวเส้นด้ายพุ่ง (weft)

ตารางที่ 4.2 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก

samples	Tensile strength (MPa)		Elongation at break (%)	
	warp	weft	warp	weft
untreated silk	37.92 ± 1.32	88.66 ± 2.22	16.87 ± 1.00	12.80 ± 1.46
2h formic-treated silk	44.61 ± 1.03	93.51 ± 1.43	51.94 ± 2.29	33.84 ± 1.05
4h formic-treated silk	48.64 ± 1.43	105.73 ± 2.93	64.71 ± 3.03	38.88 ± 1.67
6h formic-treated silk	57.20 ± 2.08	116.89 ± 3.29	74.14 ± 1.91	45.85 ± 2.82

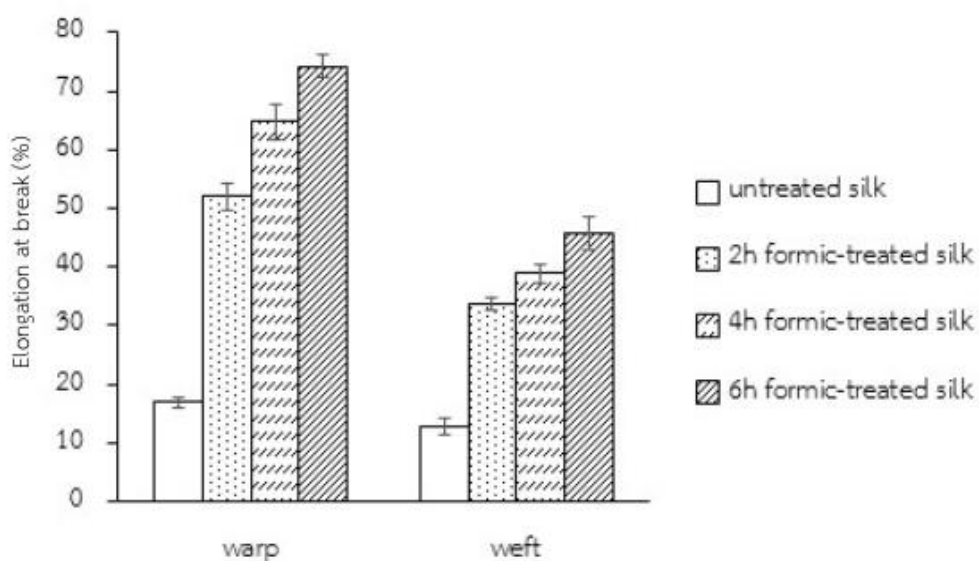
จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟเปรียบเทียบความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกในเวลาต่างๆ แสดงให้เห็นว่าผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากกรดฟอร์มิกมีความสามารถในการสอดแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึก β -sheet ในเฉพาะบริเวณผิวของเส้นไหม ในขณะที่ผลึก β -sheet ส่วนที่อยู่ลึกภายในโครงสร้าง แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากกรดฟอร์มิกอาจจะซึมเข้าไปไม่ถึง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากเทคนิค FTIR คือ ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกยังคงแสดงพีคเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึก β -sheet เหมือนกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้ปริมาณผลึกจากผลการวิเคราะห์ XRD ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าไหมดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จึงสรุปได้ว่าผลึก β -sheet บริเวณผิวเส้นไหมเท่านั้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างอสัณฐานเมื่อปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก เมื่อพิจารณาความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกในเวลาต่างๆ พบว่าความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพผ้าไหม ค่าความทนแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณอสัณฐานหรือส่วนที่ไม่เป็นระเบียบที่

ผิวเส้นไหมกลับมาเป็นผลึก β -sheet อีกครั้งด้วยแรงดึงที่กระทำตามแนวเส้นใยในระหว่างทำการทดสอบ [35] ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบมากขึ้นรวมทั้งมีปริมาณผลึกที่มากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้แรงในการดึงเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพมากขึ้น กรดฟอร์มิกก็จะสามารถซึมเข้าไปภายในเส้นไหมได้ลึกยิ่งขึ้น และเปลี่ยนโครงสร้าง β -sheet ให้มีความไม่เป็นระเบียบได้มากขึ้น เมื่อได้รับแรงดึงปริมาณผลึก β -sheet ที่ได้จากการจัดเรียงตัวใหม่ก็จะแปรผันตามปริมาณออสซิลเลชันของเส้นไหมที่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้หากพิจารณาความทนแรงดึงของผ้าไหมทั้งตามแนวเส้นด้ายยืน และตามแนวเส้นด้ายพุ่ง พบว่าความทนแรงดึงของผ้าไหมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในแนวเส้นด้ายยืนและแนวเส้นด้ายพุ่งตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ แต่อย่างไรก็ตามความทนแรงดึงของผ้าไหมทั้งสองแนวมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบจึงไม่ควรวางผืนผ้าไหมในทิศทางเดียวกันตลอดชิ้นงาน



รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก

เมื่อพิจารณาการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมากกว่าผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และมีแนวโน้มแบบเดียวกันทั้งในแนวเส้นด้ายยืน และแนวเส้นด้ายพุ่ง โดยความอ่อนตัว (soft) และการยืดหด (flexible) ของสายโซ่เปปไทด์ (peptide chain) ที่เป็นเฟสออสซิลเลชัน เป็นส่วนที่ส่งผลต่อความยืดหยุ่น (elasticity) ของผ้าไหม และช่วยในการกระจายแรงกระทำจากภายนอก [36]



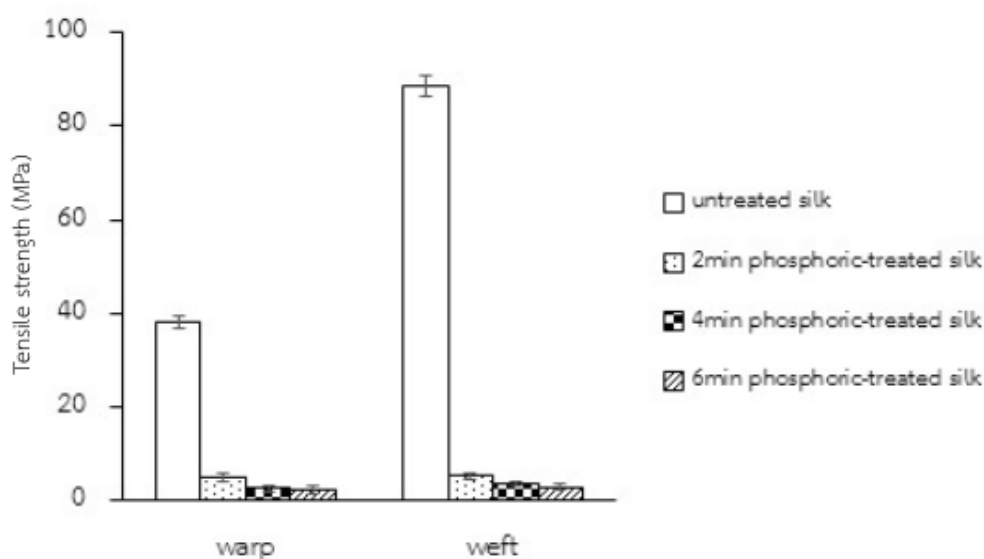
รูปที่ 4.8 การยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก

สำหรับสมบัติความทนแรงดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก เป็นเวลา 2, 4 และ 6 นาที แสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งในแนวเส้นด้ายยืน (warp) และแนวเส้นด้ายพุ่ง (weft)

ตารางที่ 4.3 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก

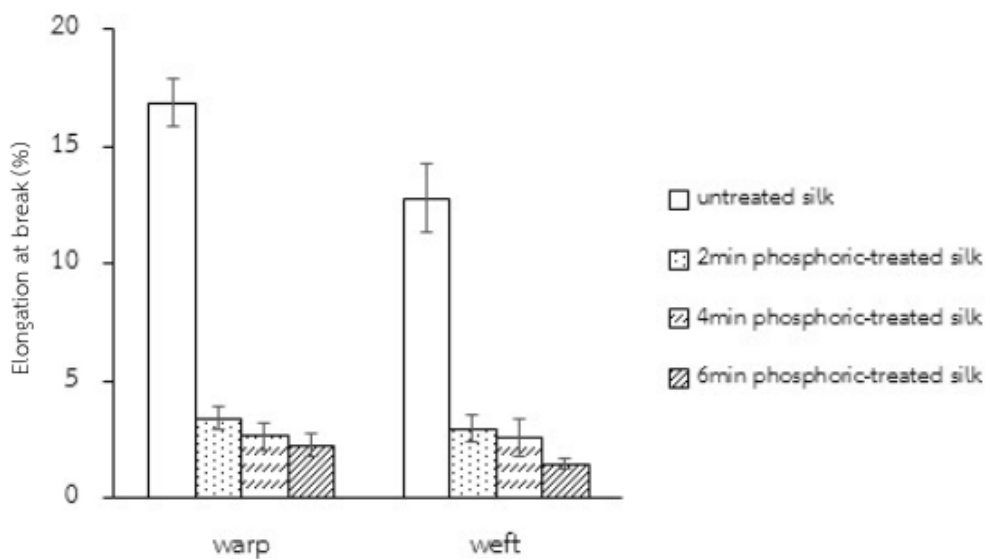
samples	Tensile strength (MPa)		Elongation at break (%)	
	warp	weft	warp	weft
untreated silk	37.92±1.32	88.66±2.22	16.87±1.00	12.80±1.46
2min phosphoric-treated silk	4.95±0.63	5.14±0.57	3.40±0.41	2.97±0.59
4min phosphoric-treated silk	2.62±0.62	3.44±0.45	2.64±0.60	2.60±0.79
6min phosphoric-treated silk	2.24±0.75	2.77±0.69	2.25±0.51	1.44±0.22

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟเปรียบเทียบความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกที่สภาวะต่างๆ สามารถเห็นได้ชัดว่าผ้าไหมหลังจากการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก มีความทนแรงดึงน้อยลงมาก เนื่องจากกรดฟอสฟอริกเป็นกรดแก่ที่มีค่าความเป็นกรดสูงมาก จึงส่งผลต่อโครงสร้างของไหม ทำให้เส้นไหมเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด (dimensional change) การแตกหักของพันธะ (bond breakage) การสลายตัวของสายโซ่โปรตีน (degradation of protein chain) และโมเลกุลของผ้าไหมบางส่วนได้รับความเสียหายขณะทำการปรับสภาพ [35]



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก

สำหรับค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก (รูปที่ 4.10) มีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่าความทนแรงดึง และลดลงเรื่อยๆตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ โดยมีเหตุผลเดียวกับค่าความทนแรงดึงคือ กรดฟอสฟอริกเป็นกรดแก่ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกแบบ β -sheet ทำให้ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกสูญเสียสภาพความเป็นผ้า กลายเป็นวัสดุลักษณะคล้ายฟิล์มที่มีความเปราะและขาดง่าย ดังนั้นผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกในงานวิจัยนี้จึงไม่เหมาะสมต่อการนำไปเสริมแรงให้กับอ็อกซี่

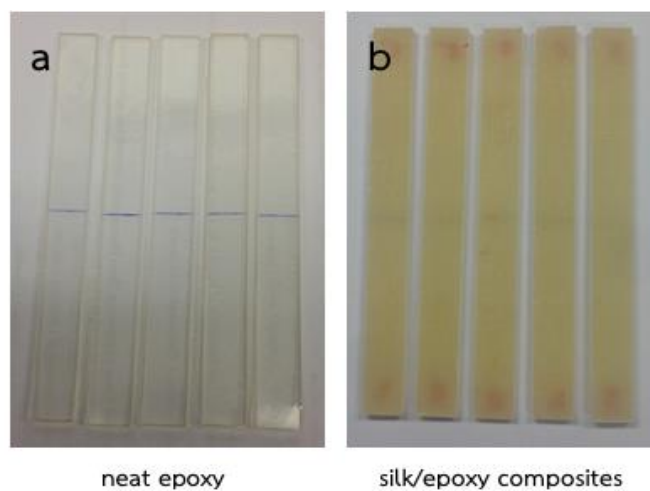


รูปที่ 4.10 การยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก

4.2 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี

รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะชิ้นงานของอีพ็อกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม รูปที่ 4.9a คือ อีพ็อกซีที่ไม่มีตัวเสริมแรง มีสีใส โปร่งแสง มีความแข็งแต่เปราะและแตกหักง่าย ขณะที่ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม (รูปที่ 4.9b) มีสีเหลืองใสตามสีของผ้าไหม มีความโปร่งแสง และจะทึบแสงขึ้นเรื่อยๆตามจำนวนชั้นของผ้าไหมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย

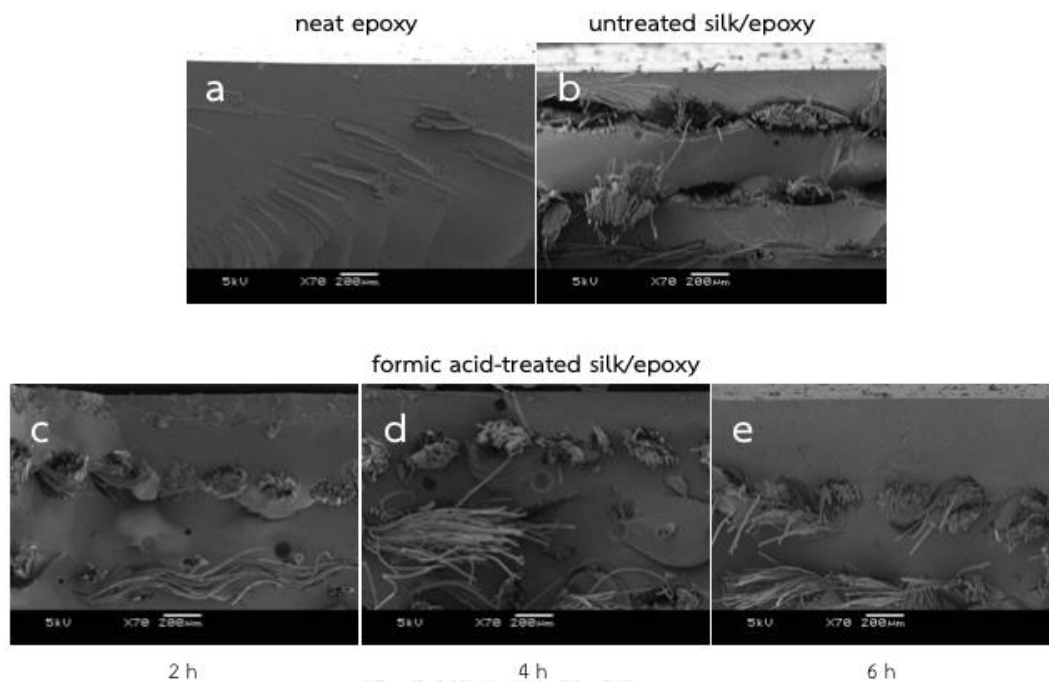


รูปที่ 4.11 ลักษณะชิ้นงาน (a) อีพ็อกซีบริสุทธิ์ และ (b) วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

4.2.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวที่แตกหักของอีพ็อกซี วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกในเวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.12 โดยอีพ็อกซีบริสุทธิ์ (รูปที่ 4.12a) แสดงพื้นผิวรอยแตกที่เรียบ เพราะการแตกร้าวเกิดขึ้นในแนวระนาบ เรียกบริเวณนี้ว่าโซนกระจก (mirror zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่รอยแตกเกิดอย่างช้าๆ (slow crack propagation) หลังจากมีรอยร้าวเกิดขึ้น (crack initiation) เมื่อได้รับแรงกระแทก ในขณะที่บริเวณการแผ่ขยายของรอยร้าวที่เกิดเร็วขึ้นจะแสดงผิวการแตกหักในลักษณะเป็นริ้วๆ ในแนวรัศมี (mist zone) ซึ่งรอยแตกนี้ยังคงเกิดขึ้นในแนวระนาบ หลังจากนั้นจะมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในระนาบสามมิติ (3D plane) ทำให้ผิวรอยแตกบริเวณดังกล่าวมีลักษณะค่อนข้างหยาบ (hackle zone) ซึ่งลักษณะผิวรอยแตกที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นลักษณะของวัสดุที่มีความเปราะ [37]

สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (รูปที่ 4.12b) จะเห็นผิวรอยแตกร้าวของอีพ็อกซีที่เรียบ และผิวอีพ็อกซีมีรอยแตกเกิดขึ้นเป็นริ้วๆแผ่ขยายจากผ้าไหมชั้นหนึ่งไปยังผ้าไหมชั้นถัดไป นอกจากนี้ระหว่างชั้นของผ้าไหมและอีพ็อกซีเกิดการแยกออกจากกัน (delamination) และมีโพรงช่องว่างของกลุ่มเส้นใยเกิดขึ้น ซึ่งช่องว่างนี้เกิดจากเส้นใยหลุดออกจากเนื้ออีพ็อกซี (fiber pull-out) เมื่อได้รับแรงกระแทก เพราะมีแรงยึดติดไม่ดีระหว่างกัน ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก (รูปที่ 4.12c-4.12e) แสดงให้เห็นผิวรอยแตกของอีพ็อกซีที่เรียบ เนื่องมาจากกลุ่มของเส้นใยสามารถต้านการแผ่ขยายของรอยแตกได้ นอกจากนี้ยังเห็นการหักของเส้นใย (fiber breakage) ซึ่งเป็นผลจากการปรับสภาพเส้นไหมด้วยกรดฟอร์มิก ทำให้เส้นไหมมีพื้นผิวขรุขระมากขึ้นจึงสามารถยึดเกาะกับเนื้ออีพ็อกซีได้ดี



รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก

4.2.3 ทดสอบความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี (impact testing)

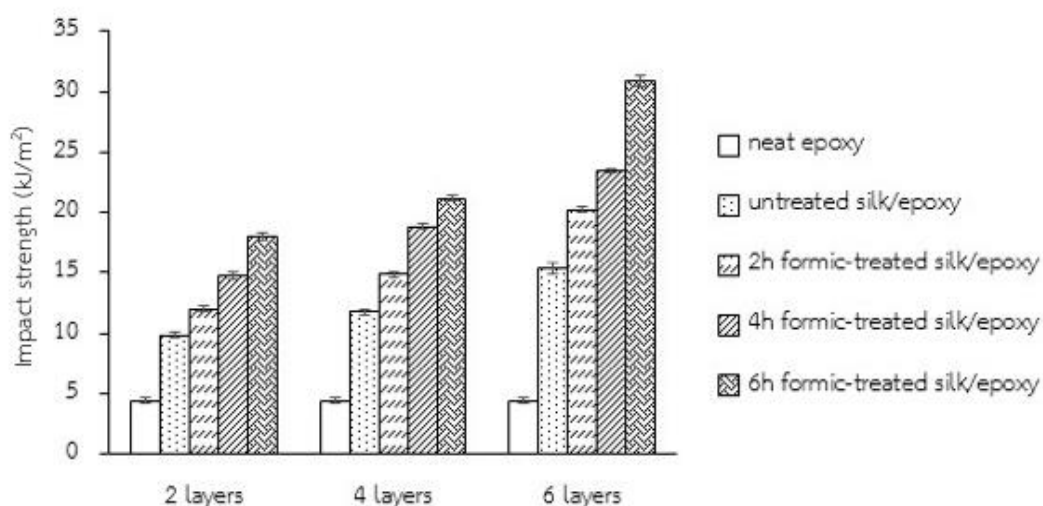
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมสูตรต่างๆ โดยมีจำนวนชั้นของผ้าไหมสำหรับเสริมแรง 2, 4 และ 6 ชั้น

ตารางที่ 4.4 สมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

samples	Impact strength (kJ/m ²)		
	2 layers	4 layers	6 layers
neat epoxy	4.37 ± 0.25	4.37 ± 0.25	4.37 ± 0.25
untreated silk/epoxy	9.67 ± 0.34	11.78 ± 0.19	15.69 ± 0.68
2h formic-treated silk/epoxy	12.02 ± 0.23	14.85 ± 0.21	20.20 ± 0.24
4h formic-treated silk/epoxy	14.69 ± 0.31	18.81 ± 0.24	23.43 ± 0.18
6h formic-treated silk/epoxy	17.98 ± 0.31	21.16 ± 0.18	30.84 ± 0.49

เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงกระแทกของอีพ็อกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมจำนวน 2 ชั้น (รูปที่ 4.13) พบว่าทั้งวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าอีพ็อกซีบริสุทธิ์ เพราะผ้าไหมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ได้รับจากแรงกระแทก ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการรับและกระจายแรงได้ดีขึ้น นอกจากนี้ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกจะมีพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น ส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างผ้าไหมและอีพ็อกซีดีขึ้น ในกรณีของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพในเวลาต่างๆ โดยมีชั้นของผ้าไหมจำนวน 4 และ 6 ชั้น มีค่าความทนแรงกระแทกในทิศทางเดียวกันกับการเสริมแรงด้วยผ้าไหม 2 ชั้นดังที่กล่าวมาข้างต้นคือ ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพผ้าไหม

นอกจากนี้หากพิจารณาในกรณีการเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ใช้เวลาในการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเท่ากัน แต่มีจำนวนชั้นของผ้าไหมสำหรับการเสริมแรงต่างกัน พบว่าความทนแรงกระแทกของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณผ้าไหมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณผ้าไหมที่เพิ่มขึ้นทำให้ในชิ้นงานมีระยะห่างของชั้นผ้าไหมน้อยลง ซึ่งผ้าไหมสามารถช่วยลดการเติบโตของรอยแตกของอีพ็อกซีได้



รูปที่ 4.13 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

4.2.4 ทดสอบความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี (flexural testing)

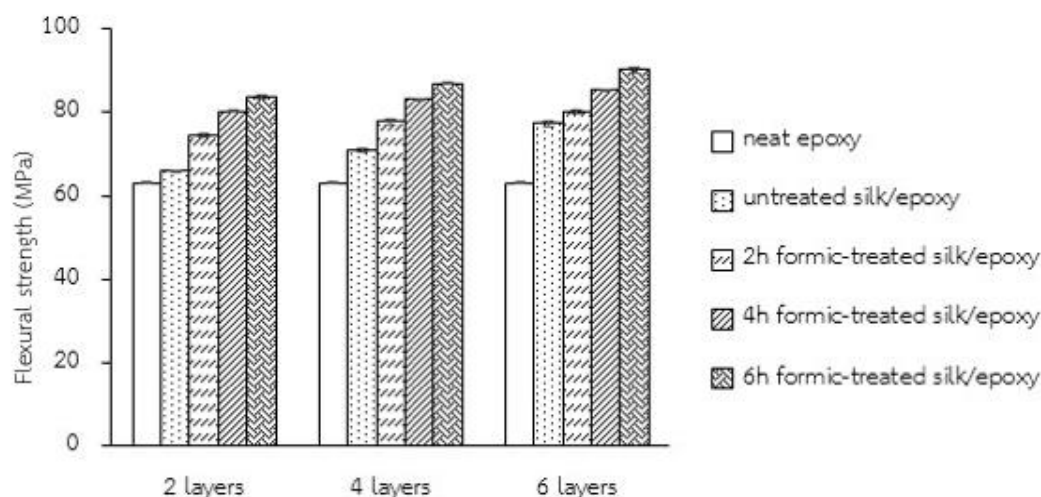
ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติความทนแรงดัดโค้งของอีพ็อกซี วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิก โดยมีจำนวนชั้นของผ้าไหม 2, 4 และ 6 ชั้น

ตารางที่ 4.5 สมบัติความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

samples	Flexural strength (MPa)		
	2 layers	4 layers	6 layers
neat epoxy	63.11 ± 0.26	63.11 ± 0.26	63.11 ± 0.26
untreated silk/epoxy	65.91 ± 0.31	70.82 ± 0.37	77.32 ± 0.58
2h formic-treated silk/epoxy	74.48 ± 0.30	77.82 ± 0.77	80.11 ± 0.52
4h formic-treated silk/epoxy	80.27 ± 0.25	83.14 ± 0.28	85.39 ± 0.26
6h formic-treated silk/epoxy	83.80 ± 0.38	87.04 ± 0.39	90.18 ± 0.45

เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมจำนวน 2 ชั้น (รูปที่ 4.14) พบว่าทั้งวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าอีพ็อกซีบริสุทธิ์ เพราะการเสริมแรงด้วยผ้าไหมจะช่วยให้อีพ็อกซีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดี นอกจากนี้ชั้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากเหตุผลของการยึดติดผิวระหว่างผ้าไหมและอีพ็อกซีดีขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับในกรณีของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมจำนวน 4 และ 6 ชั้น มีค่าความทนแรงดัดโค้งในทิศทางเดียวกันกับการเสริมแรงด้วยผ้าไหม 2 ชั้นคือ วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมมีความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพผ้าไหม

นอกจากนี้หากพิจารณาในกรณีการเสริมแรงด้วยผ้าไหมแบบเดียวกัน แต่มีจำนวนชั้นของผ้าไหมที่ใช้สำหรับเสริมแรงต่างกันคือ 2, 4 และ 6 ชั้น พบว่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณผ้าไหมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณผ้าไหมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

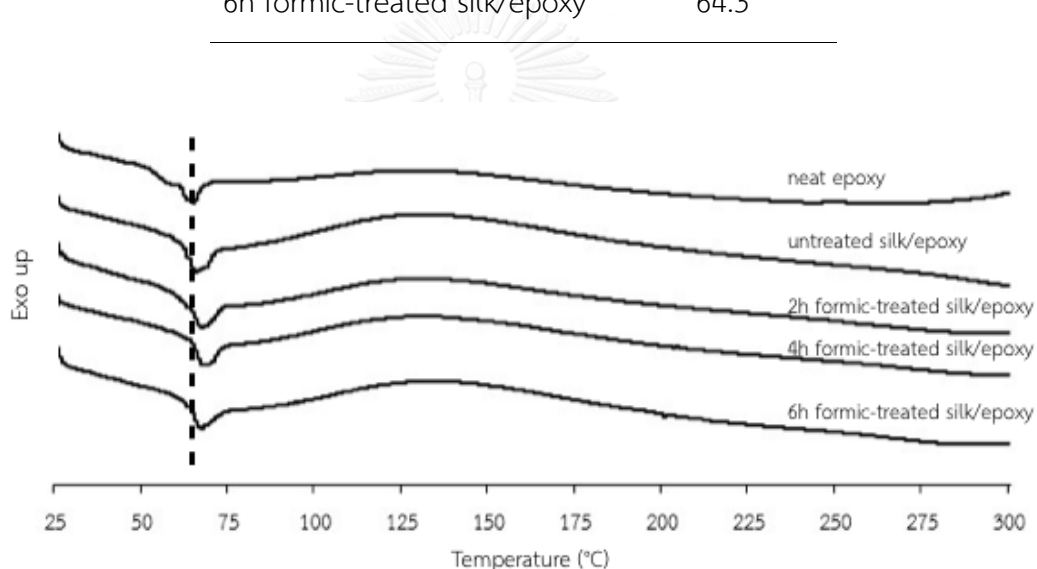
4.2.5 วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง

แคลอริเมตรี (DSC)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอีพ็อกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม พบว่าวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมมีค่า T_g ใกล้เคียงกับอีพ็อกซีบริสุทธิ์ จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าค่า T_g ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีที่เสริมแรงด้วยผ้าไหมทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเมื่อเปรียบเทียบกับอีพ็อกซีบริสุทธิ์ เนื่องจากผ้าไหมที่ใช้ในการเสริมแรงมีการยึดเกาะกับอีพ็อกซีได้ดีขึ้น ส่งผลให้เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนโมเลกุลของอีพ็อกซีจะเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิการสั่นของอีพ็อกซีสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

samples	T_g (°C)
neat epoxy	61.1
untreated silk/epoxy	62.1
2h formic-treated silk/epoxy	62.6
4h formic-treated silk/epoxy	63.1
6h formic-treated silk/epoxy	64.3



รูปที่ 4.15 DSC thermograms ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

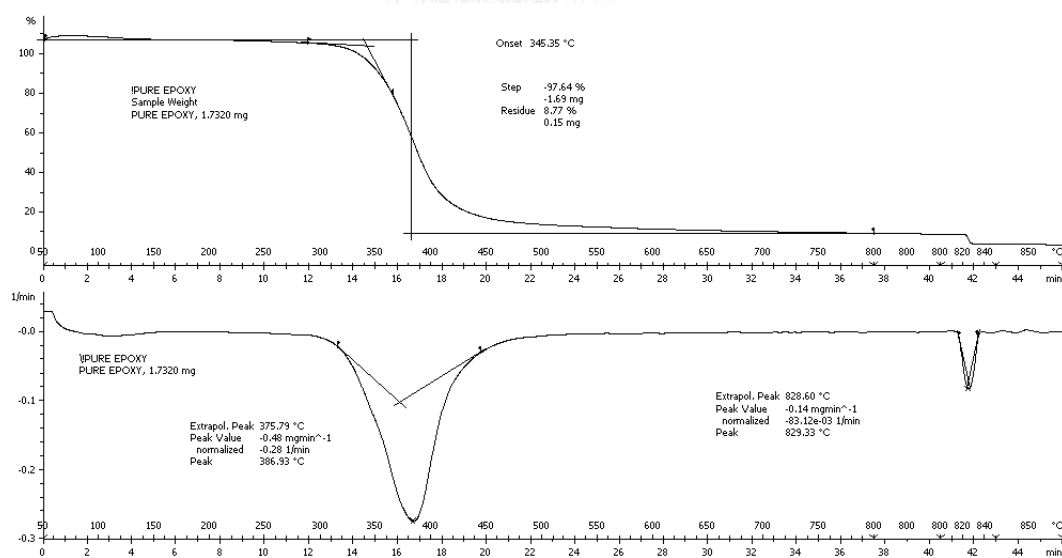
4.2.6 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

จากตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิการสลายตัว และรูปที่ 4.16-4.20 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบสูตรต่างๆ พบว่าการเสริมแรงด้วยผ้าไหมทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบลดลง เนื่องจากผ้าไหมมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าอีพ็อกซี [38] อีพ็อกซีเมื่อได้รับความร้อนสูงจะเกิดการสลายตัวและมีเถ้า (char) เกิดขึ้น จาก TGA thermogram จะเห็นการสลายตัวเกิดขึ้นสองขั้นในทุกชิ้นงาน โดยการสลายตัวในขั้นที่สองจะเป็นการสลายตัวของเถ้าที่เกิดจากอีพ็อกซี ซึ่งเถ้าที่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกคาร์บอนจะเกิดการสลายตัวช้าสุด

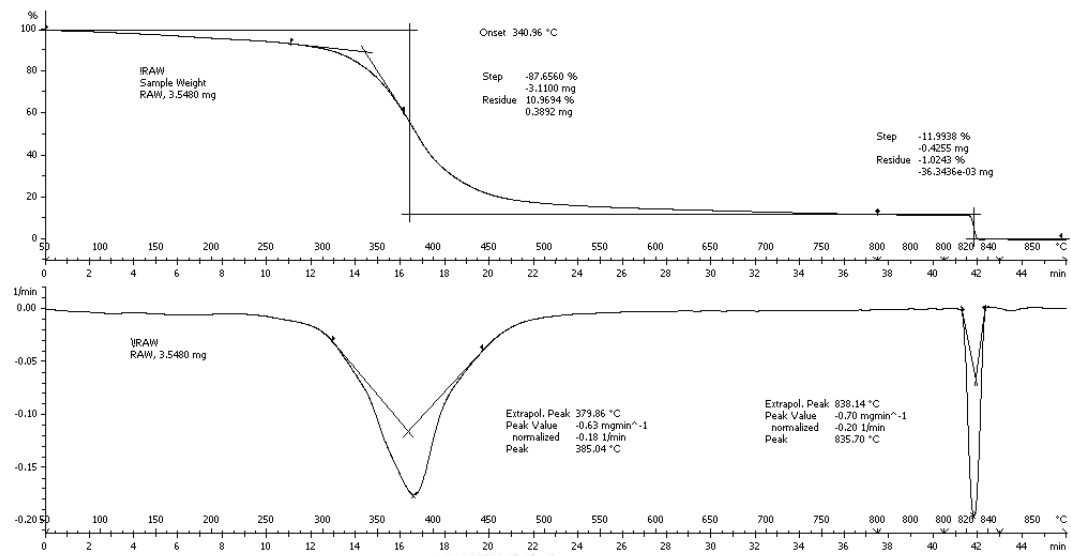
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหม

samples	T _{onset} (°C)
neat epoxy	345.4
untreated silk/epoxy	341.0
2h formic-treated silk/epoxy	338.5
4h formic-treated silk/epoxy	338.0
6h formic-treated silk/epoxy	334.2

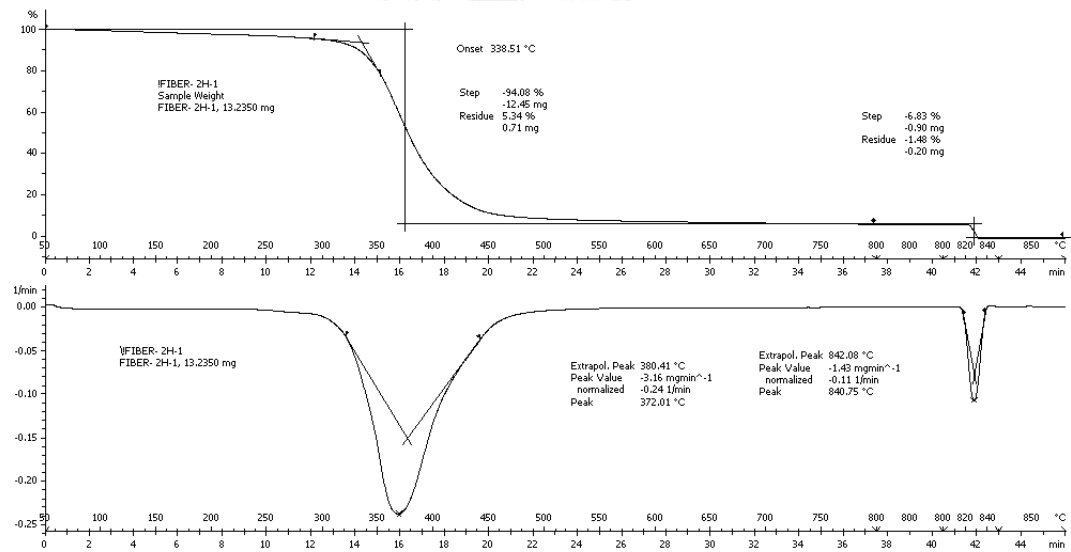
รูปที่ 4.16



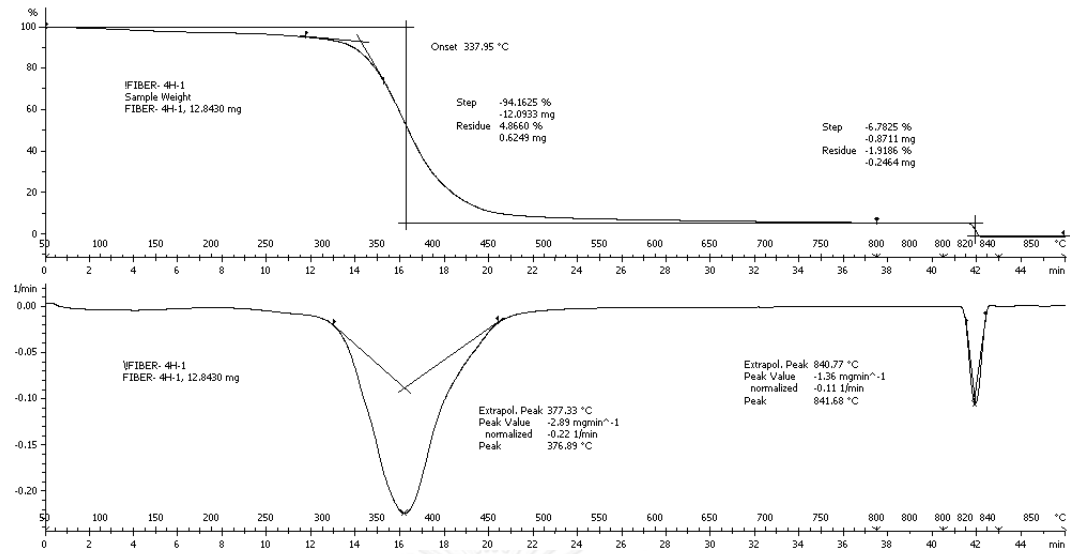
รูปที่ 4.16 TGA thermogram ของอีพ็อกซีบริสุทธิ์



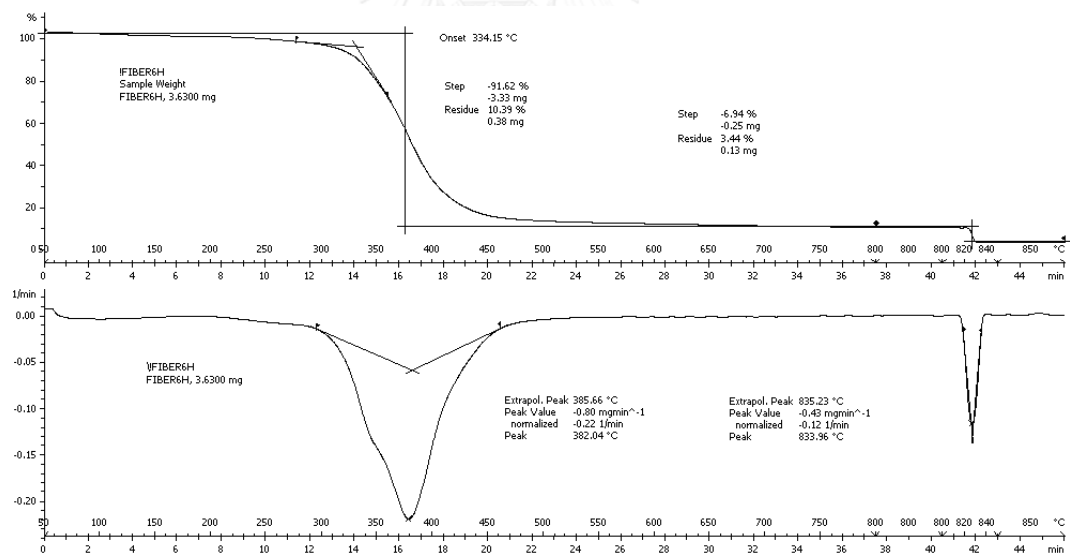
รูปที่ 4.17 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



รูปที่ 4.18 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 TGA thermogram ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีพื้นผิวที่ขรุขระขึ้น มีความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก สำหรับผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกมีความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด สูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ โดยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด เนื่องมาจากส่วนที่ไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เมื่อได้รับแรงดึง ในขณะที่ผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก มีความทนแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำที่สุด เนื่องจากกรดฟอสฟอริกเป็นกรดที่รุนแรง ทำให้เส้นไหมเกิดการบวมตัว และผลรวมเป็นเส้นเดียวกัน ส่งผลให้ความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกแบบ β -sheet ของผ้าไหมลดลง และสูญเสียสภาพความเป็นผ้า

5.1.2 การเสริมแรงให้อีพ็อกซีด้วยผ้าไหม ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าอีพ็อกซีบริสุทธิ์ โดยเฉพาะการเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกจะมีสมบัติดัดโค้งดีกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้ความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้งจะมีค่าสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ เนื่องจากผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกจะมีพื้นผิวที่ขรุขระขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างเส้นไหมกับอีพ็อกซี นอกจากนี้ยังมีปริมาณผ้าไหมเยอะขึ้น ยิ่งส่งผลให้สมบัติดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และมีผ้าไหมสำหรับเสริมแรงจำนวน 6 ชั้น มีค่าความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้งสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรมีแรงซึ่งดึงขณะทำการปรับสภาพผ้าไหมด้วยกรดเพื่อให้โครงสร้างของผ้าไหมยังคงอยู่ในสภาพ anisotropic มากที่สุด
- 5.2.2 ในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีต้องรีดไล่ฟองอากาศในชิ้นงานออกให้หมด เพื่อให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพที่ดี
- 5.2.3 ศึกษาการปรับสภาพผิวของเส้นใยด้วยกระบวนการอื่น
- 5.2.4 ศึกษาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอื่นเพื่อให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น

- 5.2.5 ศึกษาโครงสร้างการทอแบบอื่น
- 5.2.6 ศึกษาการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น



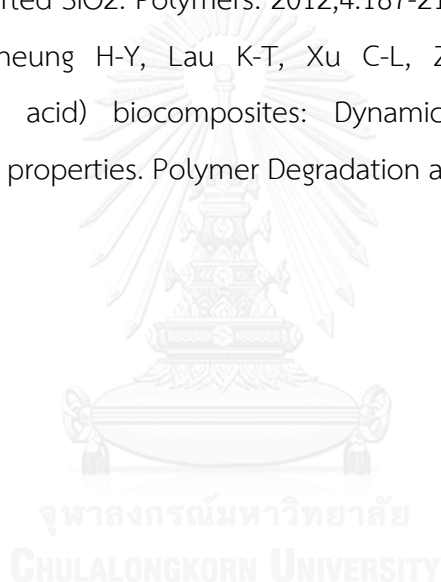
รายการอ้างอิง

1. Gardea F, Lagoudas DC. Characterization of electrical and thermal properties of carbon nanotube/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014;56:611-20.
2. Mirza FA, Afsar AM, Kim BS, Ji S. Recent developments in natural fiber reinforced composites. *Journal of Composites Science and Technology* 2009;22:41-9.
3. Meredith J, Ebsworth R, Coles SR, Wood BM, Kirwan K. Natural fibre composite energy absorption structures. *Composites Science and Technology*. 2012;72(2):211-7.
4. Ramesh M, Palanikumar K, Reddy KH. Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites. *Composites Part B: Engineering*. 2013;48:1-9.
5. Zhang J, Kaur J, Rajkhowa R, Li JL, Liu XY, Wang XG. Mechanical properties and structure of silkworm cocoons: A comparative study of *Bombyx mori*, *Antheraea assamensis*, *Antheraea pernyi* and *Antheraea mylitta* silkworm cocoons. *Materials Science and Engineering: C*. 2013;33(6):3206-13.
6. Hakimi O, Knight DP, Vollrath F, Vadgama P. Spider and mulberry silkworm silks as compatible biomaterials. *Composites Part B: Engineering*. 2007;38(3):324-37.
7. Humenik M, Scheibel T, Smith A. Spider silk: understanding the structure-function relationship of a natural fiber. *Prog Mol Biol Transl Sci*. 2011;103:131-85.
8. Sikarwar RS, Velmurugan R, Gupta NK. Influence of fiber orientation and thickness on the response of glass/epoxy composites subjected to impact loading. *Composites Part B: Engineering*. 2014;60:627-36.
9. Yan LB CN, Yuan XW. Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2012;31:425–37.

10. Epoxy [Internet]. 2016. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>.
11. Feraboli P, Cleveland T, Ciccu M, Stickler P, DeOto L. Defect and damage analysis of advanced discontinuous carbon/epoxy composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(7):888-901.
12. Sathishkumar T, Satheeshkumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014;33:1258-75.
13. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*. 2005;41(2):143-51.
14. Epoxy resin [Internet]. 2016. Available from: http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/epoxy.html.
15. Making the epoxy resin [Internet]. 2016. Available from: <http://pslc.ws/macrog/eposyn.htm>.
16. Xinfang Liu, Zhang K-Q. Silk Fiber — Molecular Formation Mechanism, Structure- Property Relationship and Advanced Applications, Oligomerization of Chemical and Biological Compounds 2014. Available from: <http://www.intechopen.com/books/oligomerization-of-chemical-and-biological-compounds/silk-fiber-molecular-formation-mechanism-structure-property-relationship-and-advanced-applications>.
17. Babu KM. 7 - Silk fibres A2 - Kozłowski, Ryszard M. *Handbook of Natural Fibres*. 1: Woodhead Publishing; 2012. p. 146-70.
18. Cheng Y KL, Li D, Ji B, Han MY, Zhang YW. On the strength of β -sheet crystallites of Bombyx mori silk fibroin. *Journal of The Royal Society Interface*. 2014;11:1-8.
19. วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น. 2007. p. 42-6.
20. Luxford N. 11 - Silk durability and degradation A2 - Annis, Patricia A. *Understanding and Improving the Durability of Textiles*: Woodhead Publishing; 2012. p. 205-32.
21. หฤทภาค กীরติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. *วิศวกรรมสารมก*. 2552-2553:18-32.
22. Phenol formaldehyde resin [Internet]. 2016. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Phenol_formaldehyde_resin.

23. C KY, V NN, S RS, S KR. Investigation of tensile properties of fiber reinforced angle ply laminated composites. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012;2(4):700-3.
24. Coupé D. 4 - Woven reinforcements for composites A2 - Boisse, Philippe. *Composite Reinforcements for Optimum Performance*: Woodhead Publishing; 2011. p. 89-115.
25. Tan KMKLaCKW. Natural Silkworm Silk-Epoxy Resin Composite for High Performance Application 2011.
26. V. Annadurai GS, R.G. Urs and R. Somashekar. Structure-property relation in varieties of silk fibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2000;79:1979-85.
27. R. Zulkifli KSPaCHA. Interlaminar fracture properties of multi-layer woven silk fibre/polyester composites. *Asian Journal of Applied Sciences*. 2008;2:177-84.
28. Craven JP, Cripps R, Viney C. Evaluating the silk/epoxy interface by means of the Microbond Test. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000;31(7):653-60.
29. P. Ramesh JA, P. Boopathi and V.M. Gokulakannan. Analysis of mechanical properties of silk/flax hybrid epoxy composite material. *International Journal of Innovation Research in Science*. 2015;4:1656-62.
30. A.U. Ude AKA, K. Sopian, A. Arifin and C.H. Azhari. The impact damage response of plain woven natural silk/epoxy laminated composite plates. *International Journal of Engineering*. 2010;2:128-40.
31. Ude AU, Ariffin AK, Azhari CH. Impact damage characteristics in reinforced woven natural silk/epoxy composite face-sheet and sandwich foam, core mat and honeycomb materials. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;58:31-8.
32. Chung DE, Kim HH, Kim MK, Lee KH, Park YH, Um IC. Effects of different Bombyx mori silkworm varieties on the structural characteristics and properties of silk. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2015;79:943-51.
33. Tieling Xing SL, Xia Xu, Guoqiang Chen. Structure and properties of silk grafted with N, N-dimethylaminoethyl methacrylate via the ARGET ATRP Method. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2012:1-6.

34. N. Thenmozhi T Ga PNS. Preparation and characterization of biocomposites: Chitosan and silk fibroin. 2013;4:88-97.
35. Ho M-p, Wang H, Lau K-t, Lee J-h, Hui D. Interfacial bonding and degumming effects on silk fibre/polymer biocomposites. Composites Part B: Engineering. 2012;43(7):2801-12.
36. Mathur AB GV. Silk fibroin-derived nanoparticles for biomedical applications. Nanomedicine. 2010;5:807-20.
37. Jianing Gao JL, Brian C. Benicewicz, Su Zhao, Henrik Hillborg and Linda S. Schadler. The mechanical properties of epoxy composites filled with rubbery copolymer grafted SiO₂. Polymers. 2012;4:187-210.
38. Zhao Y-Q, Cheung H-Y, Lau K-T, Xu C-L, Zhao D-D, Li H-L. Silkworm silk/poly(lactic acid) biocomposites: Dynamic mechanical, thermal and biodegradable properties. Polymer Degradation and Stability. 2010;95(10):1978-87.



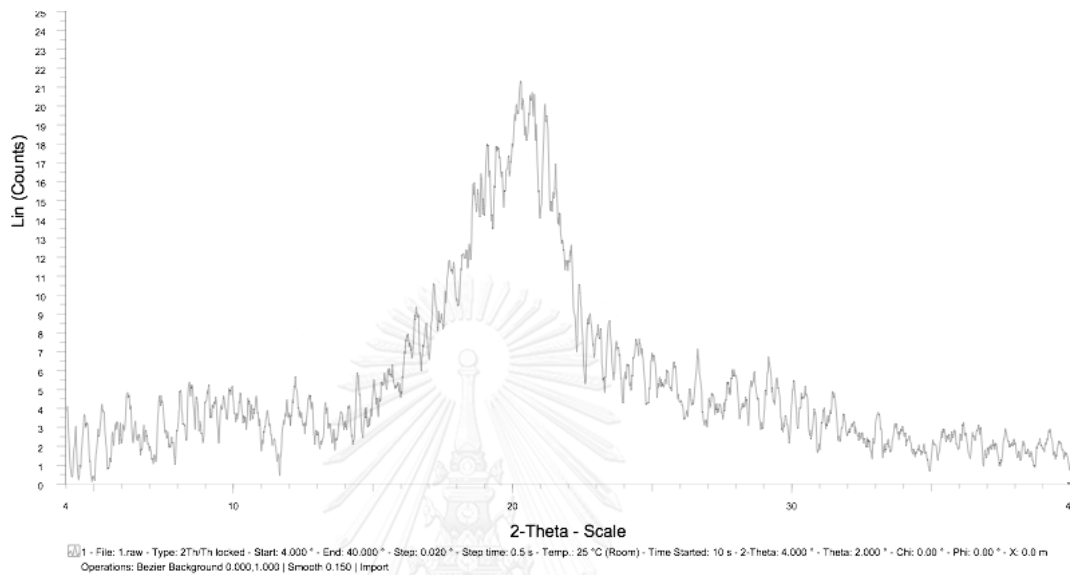


ภาคผนวก

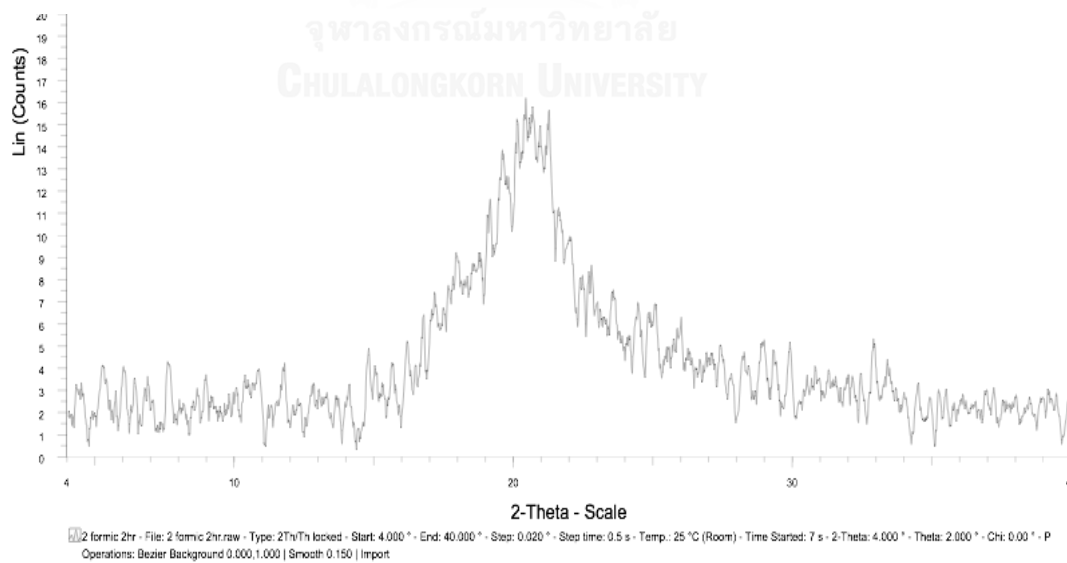
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

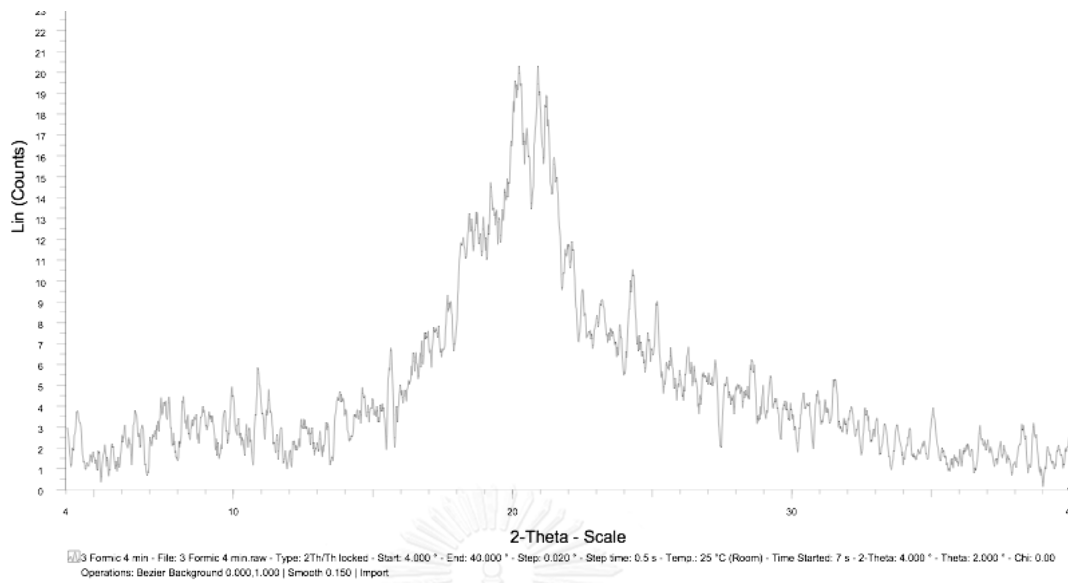
ดิฟแฟรกโทแกรมจากเทคนิค XRD ของผ้าไหม



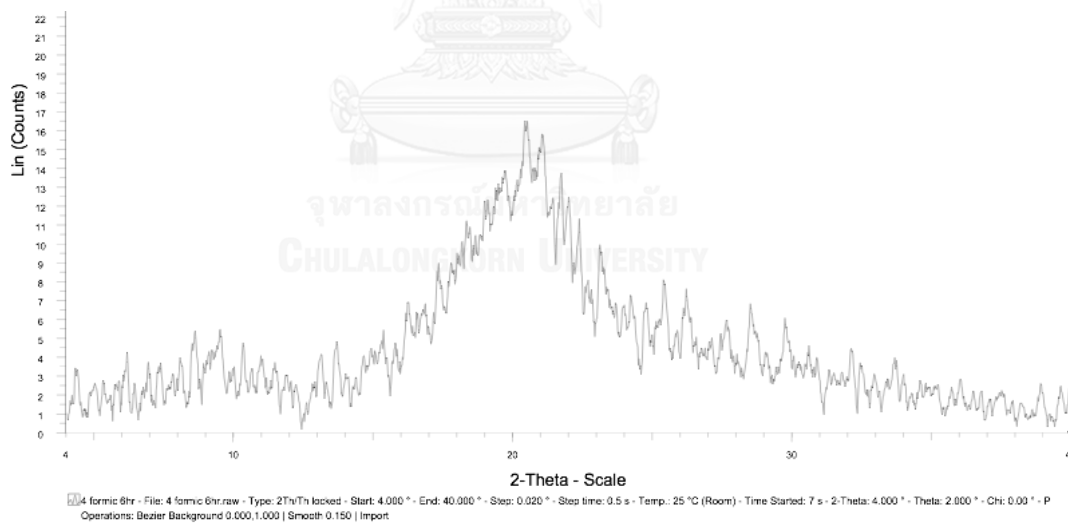
รูปที่ ก-1 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



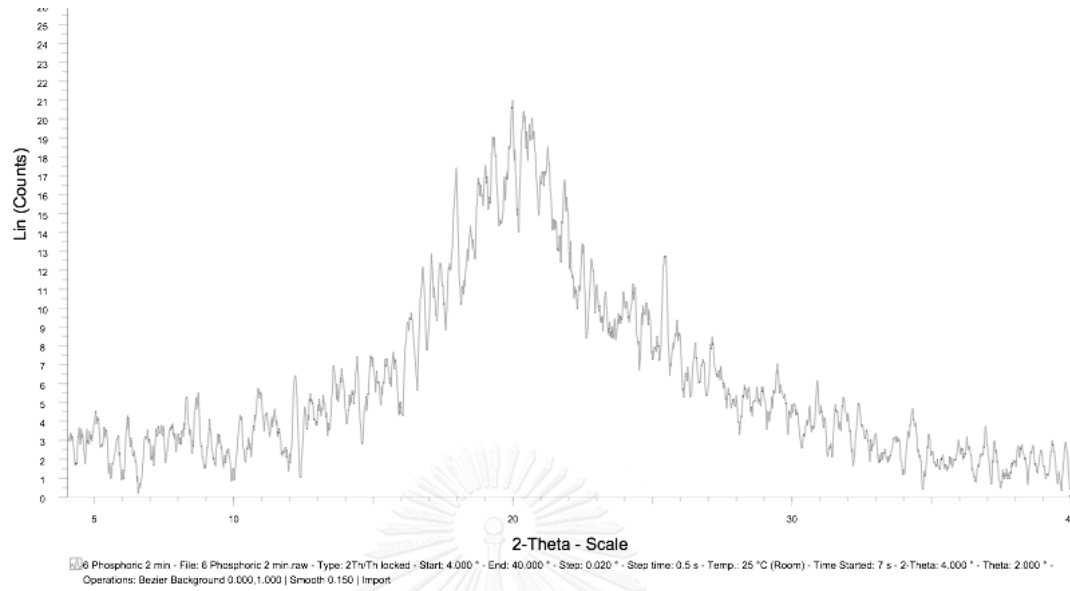
รูปที่ ก-2 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



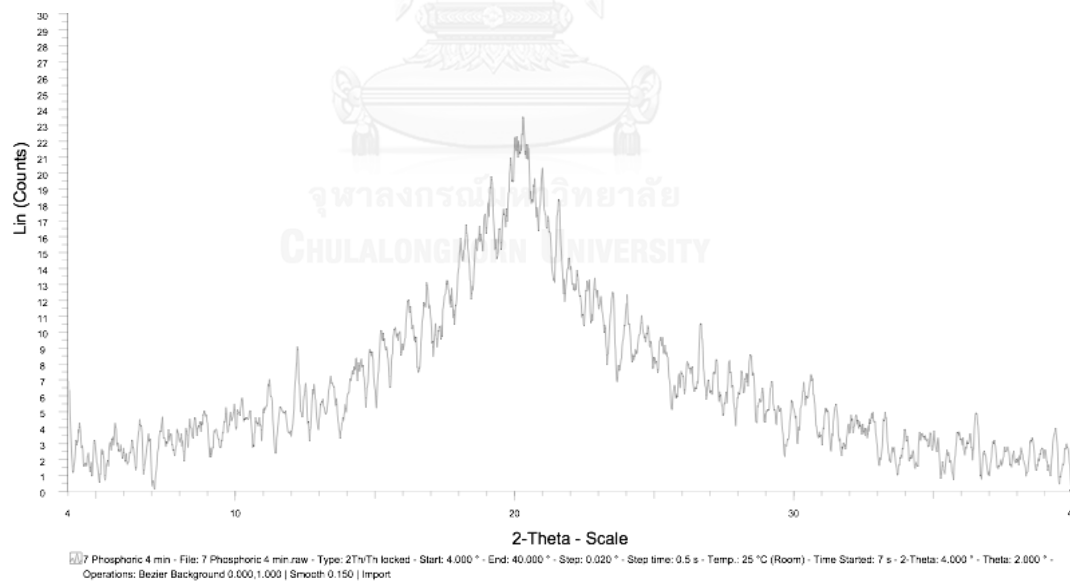
รูปที่ ก-3 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



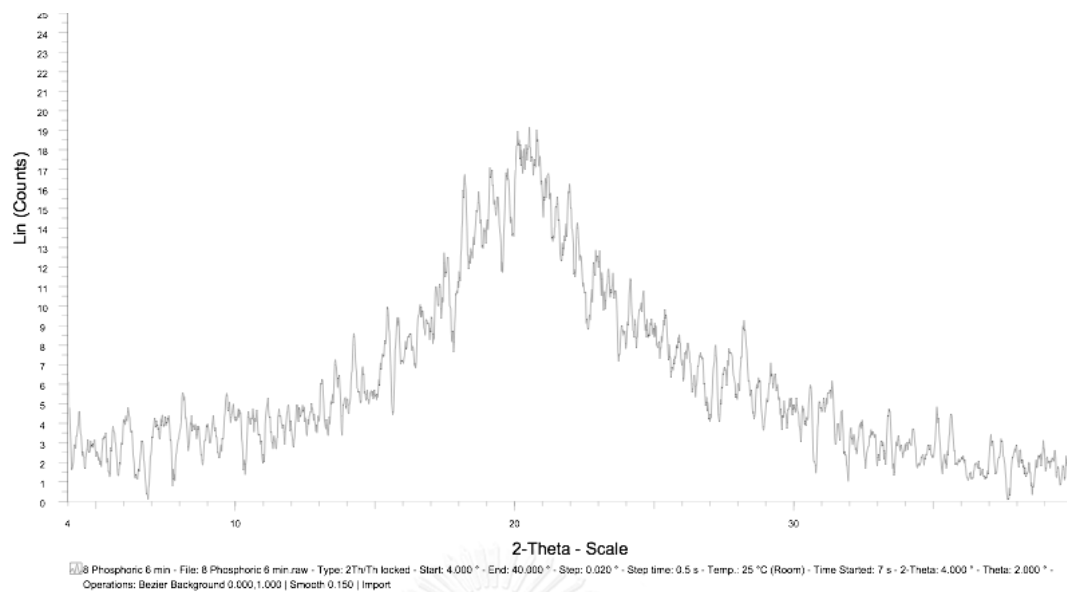
รูปที่ ก-4 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ก-5 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 2 นาที



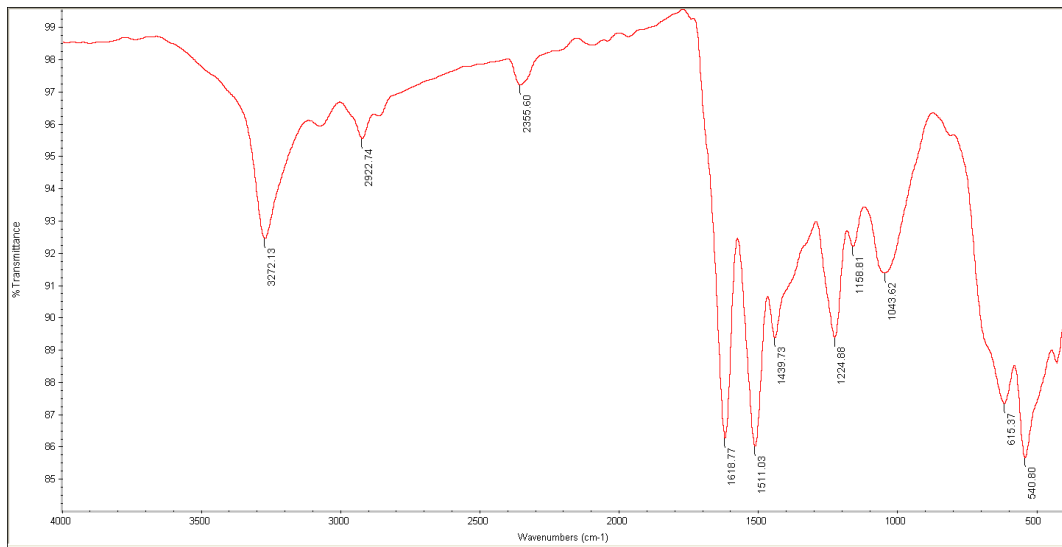
รูปที่ ก-6 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 4 นาที



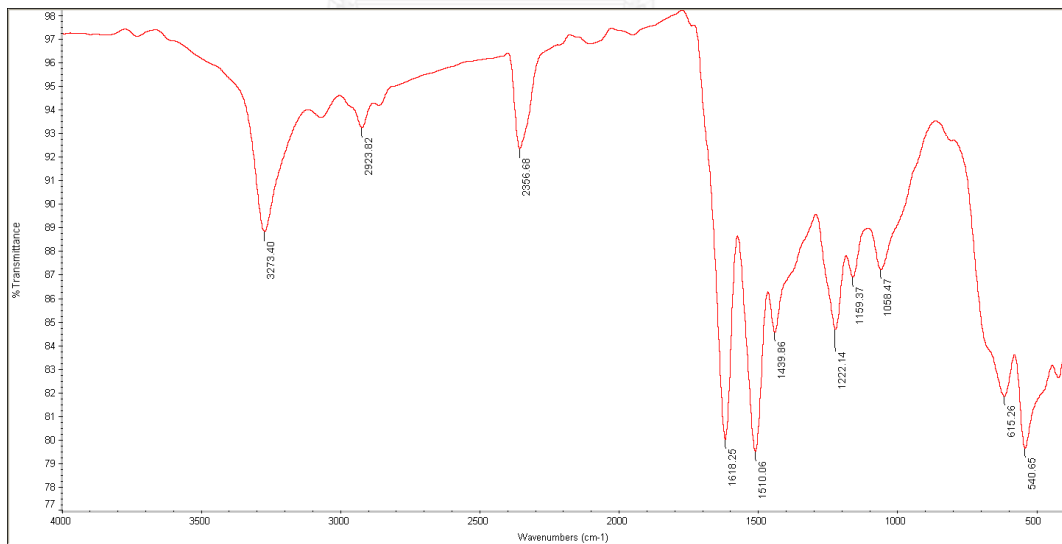
รูปที่ ก-7 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 6 นาที



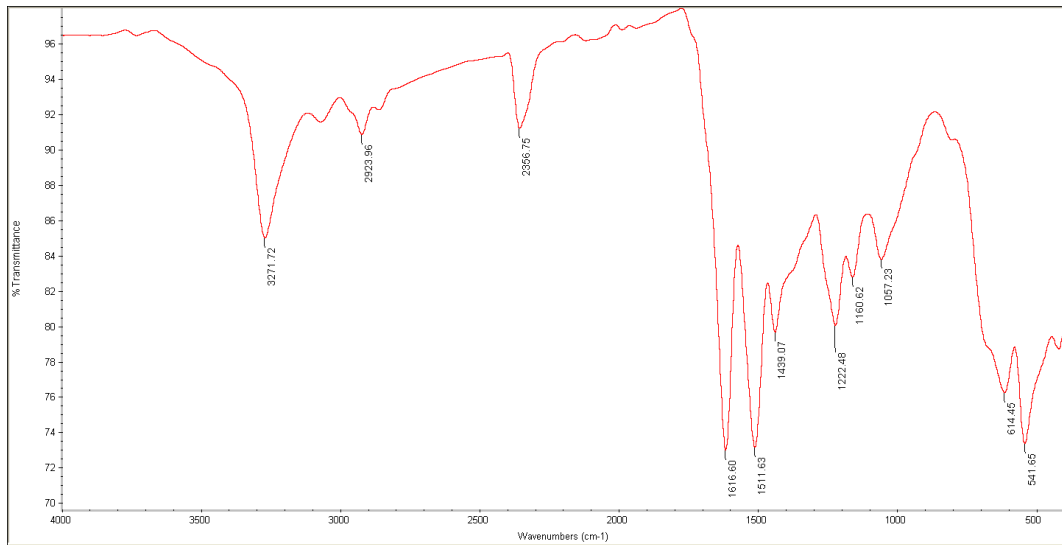
ภาคผนวก ข
สเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของผ้าไหม



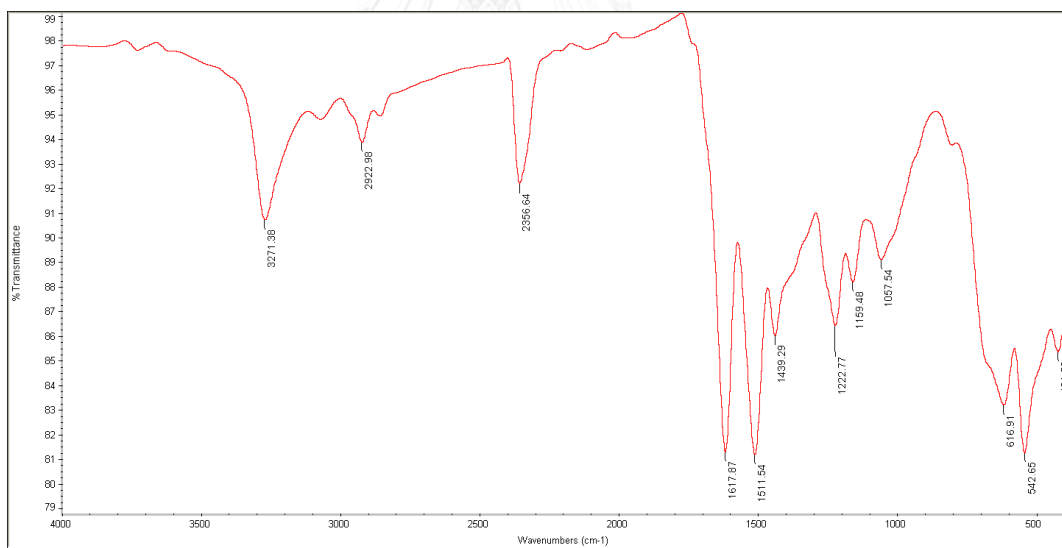
รูปที่ ข-1 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



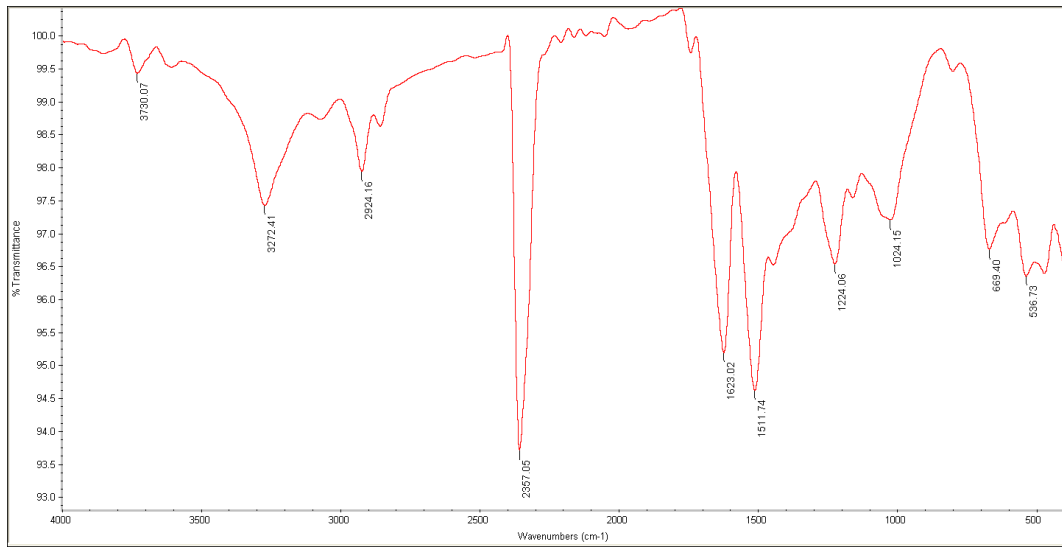
รูปที่ ข-2 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



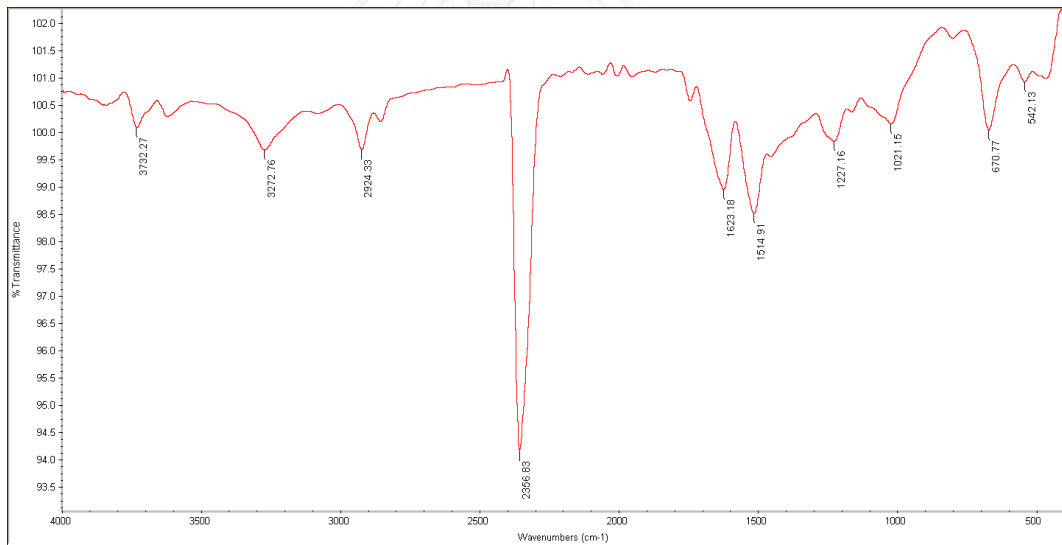
รูปที่ ข-3 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



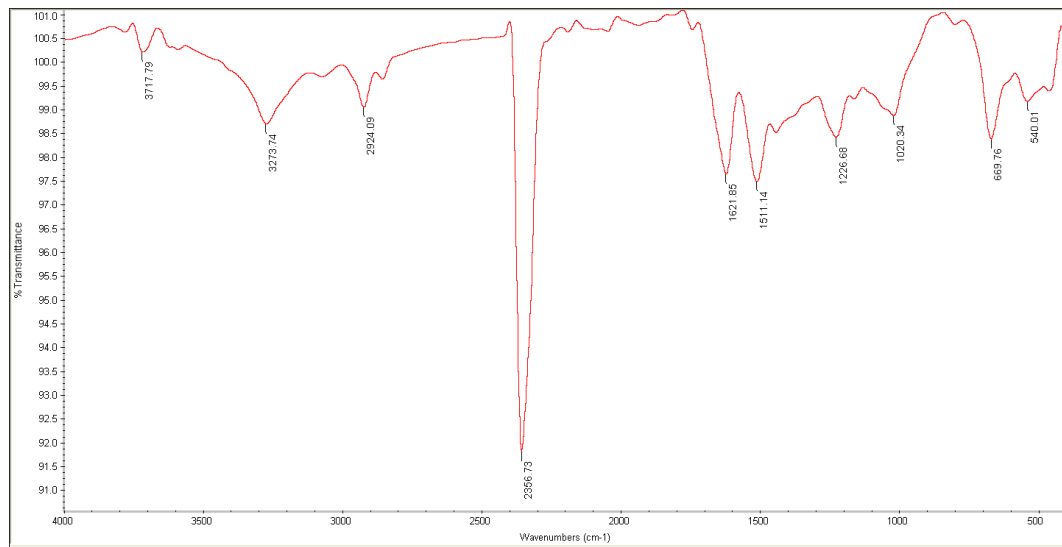
รูปที่ ข-4 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ข-5 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดโพสฟอริกเป็นเวลา 2 นาที



รูปที่ ข-6 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดโพสฟอริกเป็นเวลา 4 นาที



รูปที่ ข-7 FTIR สเปกตรัมของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 6 นาที



ภาคผนวก ค
สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของผ้าไหม

ตารางที่ ค-1 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	38.457	17.626
2	37.099	15.278
3	36.274	17.598
4	39.742	17.364
5	28.023	16.504
ค่าเฉลี่ย	37.919	16.874
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.323	1.002

ตารางที่ ค-2 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	88.915	14.611
2	89.550	13.471
3	90.371	13.311
4	84.809	11.111
5	89.673	11.484
ค่าเฉลี่ย	88.664	12.798
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.216	1.464

ตารางที่ ค-3 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	42.693	50.238
2	44.618	51.831
3	43.257	50.564
4	44.993	51.177
5	44.780	55.883
ค่าเฉลี่ย	44.068	51.939
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.026	2.288

ตารางที่ ค-4 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	94.614	35.018
2	93.875	33.517
3	91.400	32.331
4	92.800	33.698
5	94.879	34.610
ค่าเฉลี่ย	93.514	33.835
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.430	1.047

ตารางที่ ค-5 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
ในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	47.858	63.277
2	50.420	63.104
3	48.326	64.657
4	46.877	69.951
5	49.720	62.544
ค่าเฉลี่ย	48.640	64.707
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.428	3.033

ตารางที่ ค-6 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
ในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	105.022	40.012
2	103.402	38.452
3	102.651	39.241
4	108.443	36.238
5	109.137	40.477
ค่าเฉลี่ย	105.731	38.884
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.931	1.668

ตารางที่ ค-7 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
ในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	57.612	74.384
2	59.748	72.957
3	58.342	76.658
4	55.769	71.678
5	54.515	75.011
ค่าเฉลี่ย	57.197	74.138
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.075	1.912

ตารางที่ ค-8 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
ในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	112.384	42.157
2	119.967	47.111
3	120.281	49.577
4	115.587	44.251
5	116.238	46.171
ค่าเฉลี่ย	116.891	45.853
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.294	2.819

ตารางที่ ค-9 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก
เป็นเวลา 2 นาที ในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	5.131	4.018
2	5.805	3.518
3	4.052	2.937
4	4.817	3.138
5	4.950	3.410
ค่าเฉลี่ย	4.951	3.404
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.630	0.412

ตารางที่ ค-10 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก
เป็นเวลา 2 นาที ในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	5.460	3.405
2	5.931	2.482
3	4.454	3.755
4	4.817	2.803
5	5.012	2.405
ค่าเฉลี่ย	5.135	2.970
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.574	0.590

ตารางที่ ค-11 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก
เป็นเวลา 4 นาที ในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.636	2.046
2	3.072	2.664
3	2.437	3.591
4	3.128	2.664
5	2.836	2.231
ค่าเฉลี่ย	2.622	2.639
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.615	0.597

ตารางที่ ค-12 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก
เป็นเวลา 4 นาที ในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	3.869	3.384
2	3.547	1.406
3	3.832	2.321
4	3.128	2.664
5	2.836	3.231
ค่าเฉลี่ย	3.442	2.601
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.450	0.794

ตารางที่ ค-13 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก
เป็นเวลา 6 นาที ในแนวเส้นด้ายยืน

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	2.747	1.952
2	2.891	2.464
3	1.112	2.877
4	1.864	1.553
5	2.596	2.379
ค่าเฉลี่ย	2.242	2.245
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.745	0.507

ตารางที่ ค-14 สมบัติความทนแรงดึงของผ้าไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก
เป็นเวลา 6 นาที ในแนวเส้นด้ายพุ่ง

samples	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.777	1.405
2	2.924	1.482
3	3.706	1.755
4	2.864	1.146
5	2.596	1.405
ค่าเฉลี่ย	2.773	1.439
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.694	0.218

ภาคผนวก ง

สมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี

ตารางที่ ง-1 ความทนแรงกระแทกของอีพ็อกซีบริสุทธิ์

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	4.153
2	4.254
3	4.554
4	4.168
5	4.721
ค่าเฉลี่ย	4.370
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.254

ตารางที่ ง-2 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	9.176
2	9.654
3	9.550
4	10.078
5	9.871
ค่าเฉลี่ย	9.666
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.341

ตารางที่ ง-3 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	11.887
2	11.655
3	11.523
4	11.980
5	11.842
ค่าเฉลี่ย	11.777
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.185

ตารางที่ ง-4 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	15.592
2	16.765
3	14.971
4	15.280
5	15.846
ค่าเฉลี่ย	15.691
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.685

ตารางที่ ง-5 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	11.787
2	12.144
3	11.840
4	11.983
5	12.347
ค่าเฉลี่ย	12.020
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.229

ตารางที่ ง-6 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	14.732
2	15.091
3	14.993
4	14.875
5	14.568
ค่าเฉลี่ย	14.852
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.208

ตารางที่ ง-7 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	20.024
2	20.267
3	20.573
4	20.113
5	19.998
ค่าเฉลี่ย	20.195
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.236

ตารางที่ ง-8 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	14.742
2	14.231
3	14.556
4	15.024
5	14.892
ค่าเฉลี่ย	14.689
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.310

ตารางที่ ง-9 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	18.824
2	18.439
3	18.990
4	18.747
5	19.053
ค่าเฉลี่ย	18.811
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.241

ตารางที่ ง-10 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	23.458
2	23.732
3	23.250
4	23.331
5	23.393
ค่าเฉลี่ย	23.433
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.184

ตารางที่ ง-11 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	18.385
2	17.682
3	17.740
4	17.861
5	18.214
ค่าเฉลี่ย	17.976
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.308

ตารางที่ ง-12 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	21.238
2	20.991
3	21.443
4	21.105
5	21.041
ค่าเฉลี่ย	21.164
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.182

ตารางที่ ง-13 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Impact strength (kJ/m ²)
1	30.252
2	31.475
3	30.591
4	30.674
5	31.212
ค่าเฉลี่ย	30.841
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.494

ภาคผนวก จ
สมบัติความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี

ตารางที่ จ-1 ความทนแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีบริสุทธิ์

samples	Flexural strength (MPa)
1	62.79
2	63.48
3	63.23
4	62.97
5	63.07
ค่าเฉลี่ย	63.108
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.262

ตารางที่ จ-2 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	65.43
2	66.29
3	65.87
4	65.95
5	66.01
ค่าเฉลี่ย	65.910
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.311

ตารางที่ จ-3 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบบิโอฟ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	71.04
2	71.19
3	70.73
4	70.23
5	70.91
ค่าเฉลี่ย	70.820
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.371

ตารางที่ จ-4 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบบิโอฟ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	76.86
2	78.09
3	76.63
4	77.56
5	77.48
ค่าเฉลี่ย	77.324
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.584

ตารางที่ จ-5 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	74.13
2	74.35
3	74.42
4	74.93
5	74.56
ค่าเฉลี่ย	74.478
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.297

ตารางที่ จ-6 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	78.96
2	77.12
3	77.24
4	77.53
5	78.25
ค่าเฉลี่ย	77.82
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.774

ตารางที่ จ-7 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	79.23
2	80.23
3	80.36
4	80.14
5	80.60
ค่าเฉลี่ย	80.112
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.523

ตารางที่ จ-8 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	80.57
2	80.45
3	79.94
4	80.22
5	80.16
ค่าเฉลี่ย	80.268
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.248

ตารางที่ จ-9 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	82.94
2	83.51
3	83.30
4	82.80
5	83.16
ค่าเฉลี่ย	83.142
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.282

ตารางที่ จ-10 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	85.53
2	85.74
3	85.17
4	85.11
5	85.38
ค่าเฉลี่ย	85.386
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.259

ตารางที่ จ-11 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 2 ชั้น

samples	Flexural strength (MPa)
1	83.44
2	83.92
3	83.35
4	84.21
5	84.07
ค่าเฉลี่ย	83.798
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.383

ตารางที่ จ-12 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 4 ชั้น

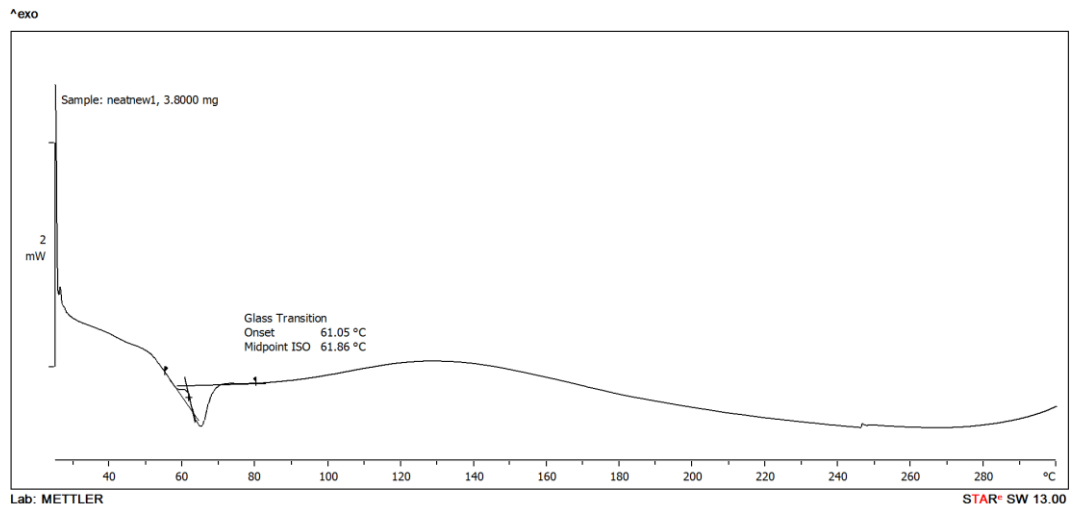
samples	Flexural strength (MPa)
1	86.65
2	86.95
3	87.04
4	86.88
5	87.69
ค่าเฉลี่ย	87.042
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.390

ตารางที่ จ-13 ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีจำนวนผ้าไหม 6 ชั้น

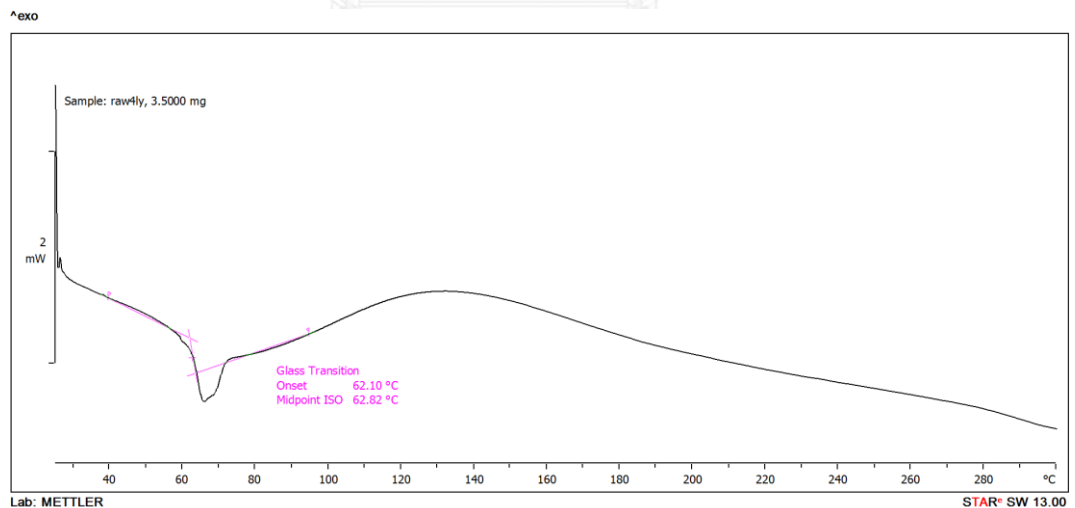
samples	Flexural strength (MPa)
1	90.15
2	89.68
3	90.67
4	90.60
5	89.79
ค่าเฉลี่ย	90.178
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.453

ภาคผนวก ฉ

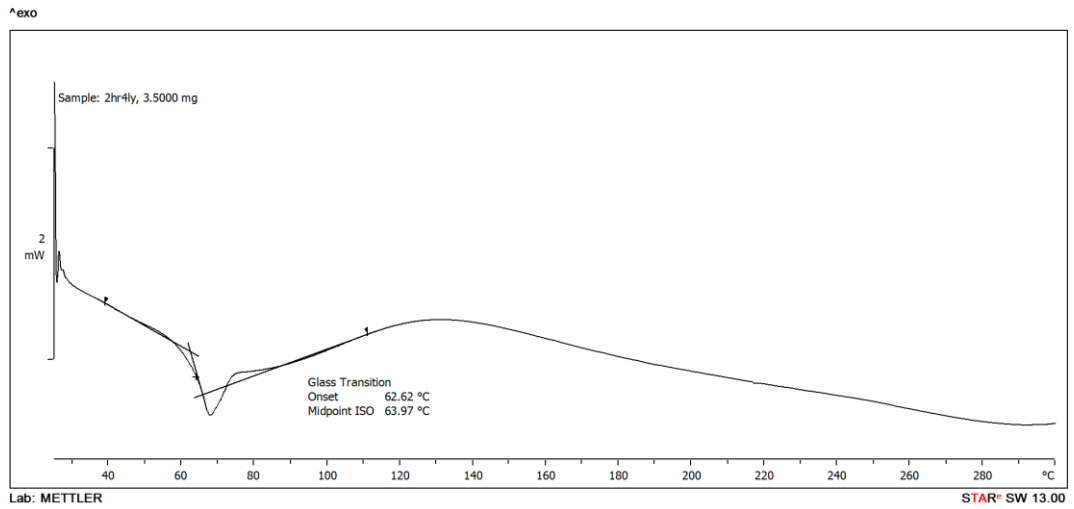
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี



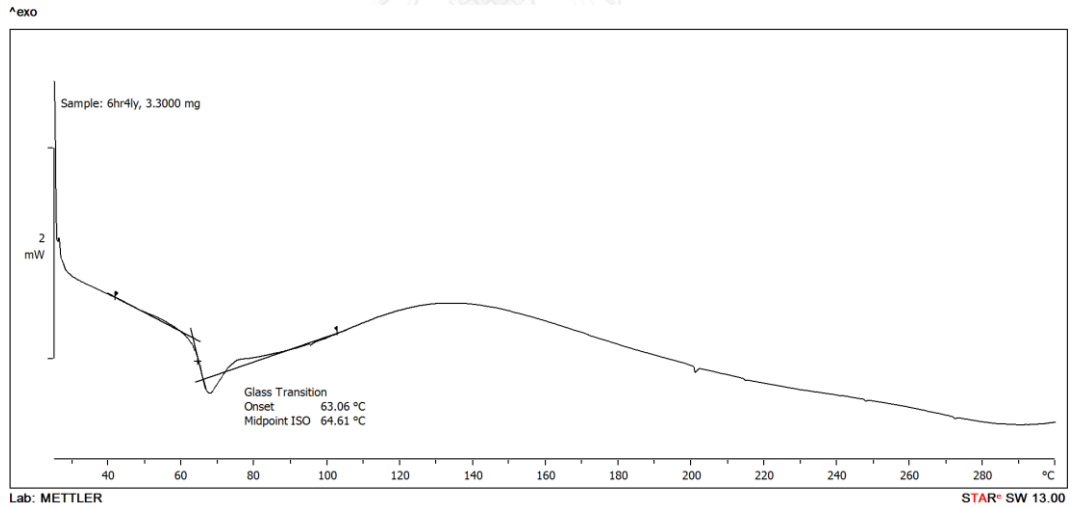
รูปที่ ฉ-1 DSC เทอร์โมแกรมของอีพ็อกซีบริสุทธิ์



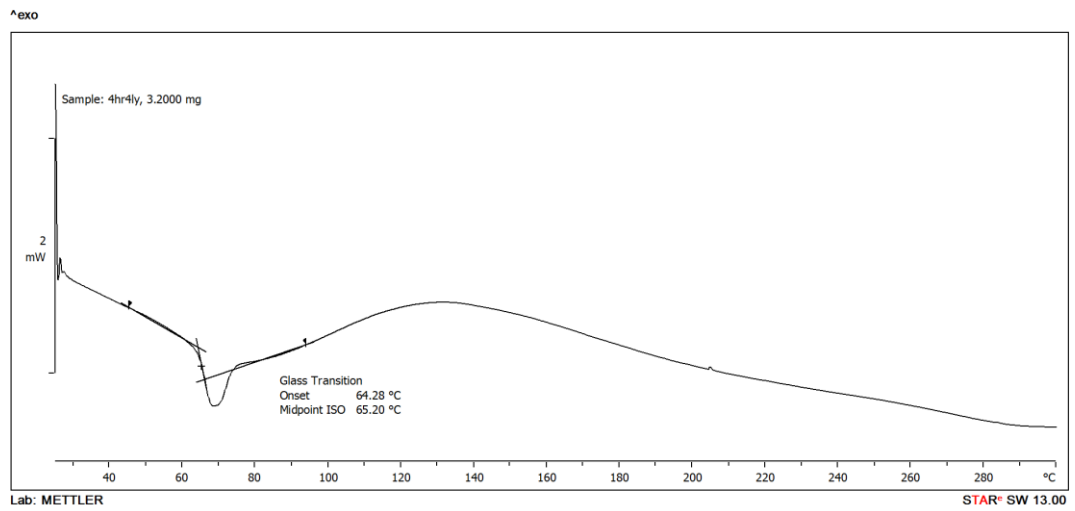
รูปที่ ฉ-2 DSC เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



รูปที่ ฉ-3 DSC เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ฉ-4 DSC เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

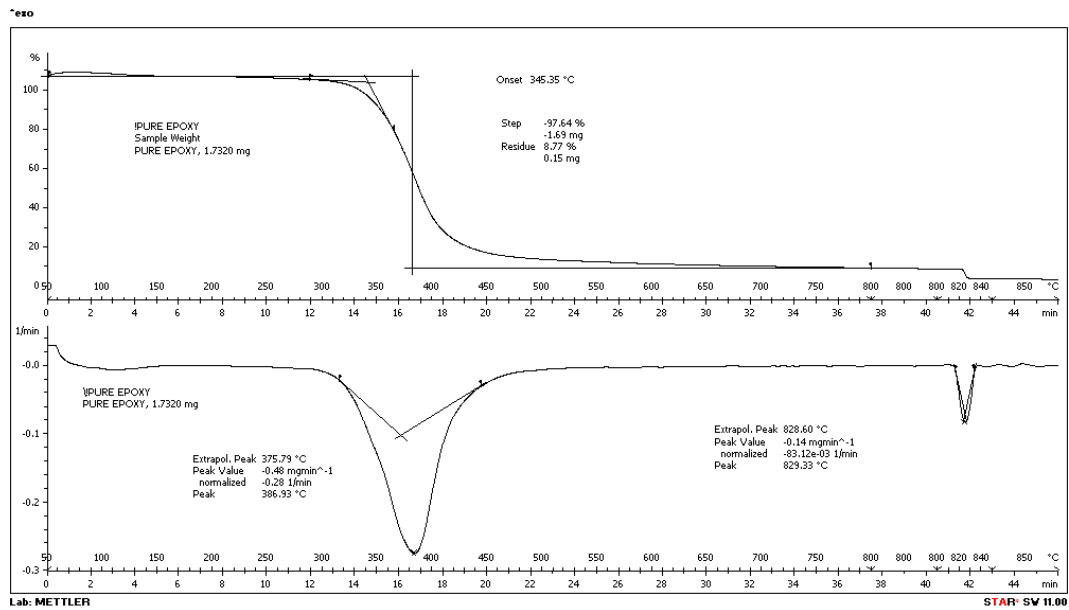


รูปที่ ฉ-5 DSC เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

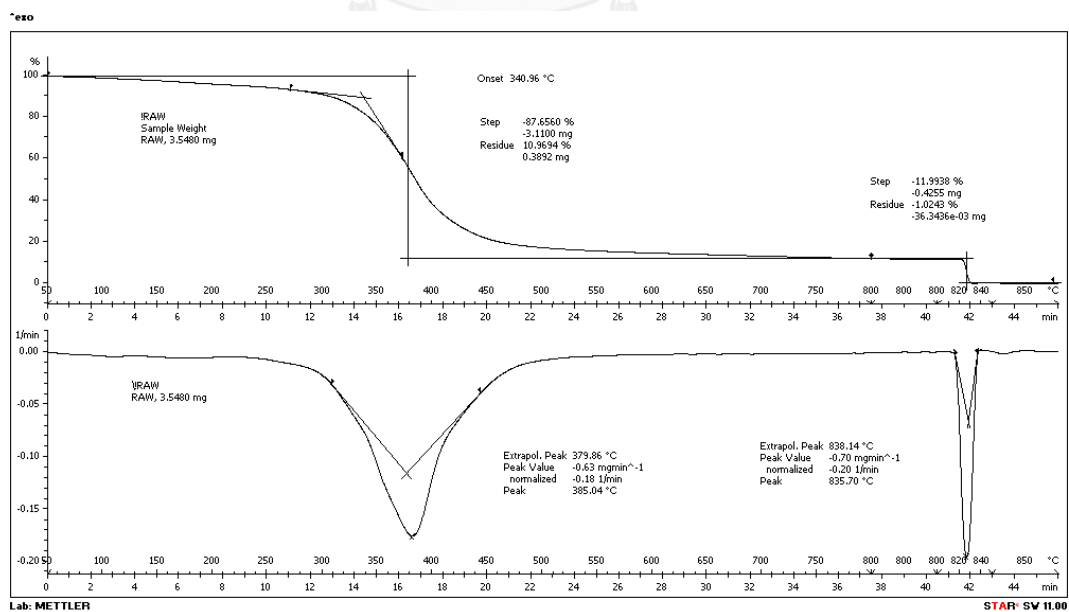


ภาคผนวก ข

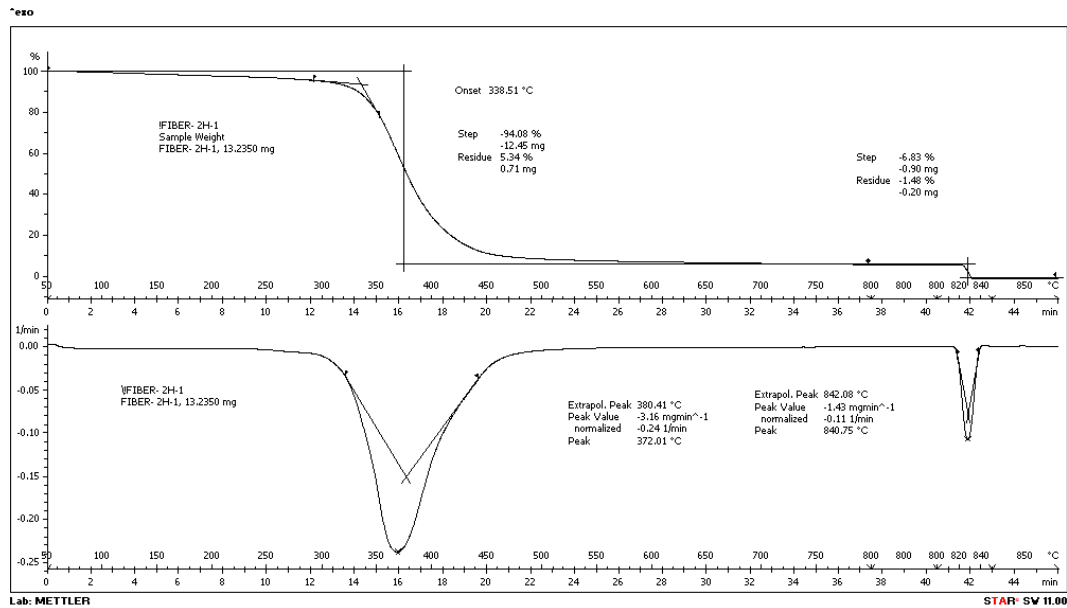
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซี



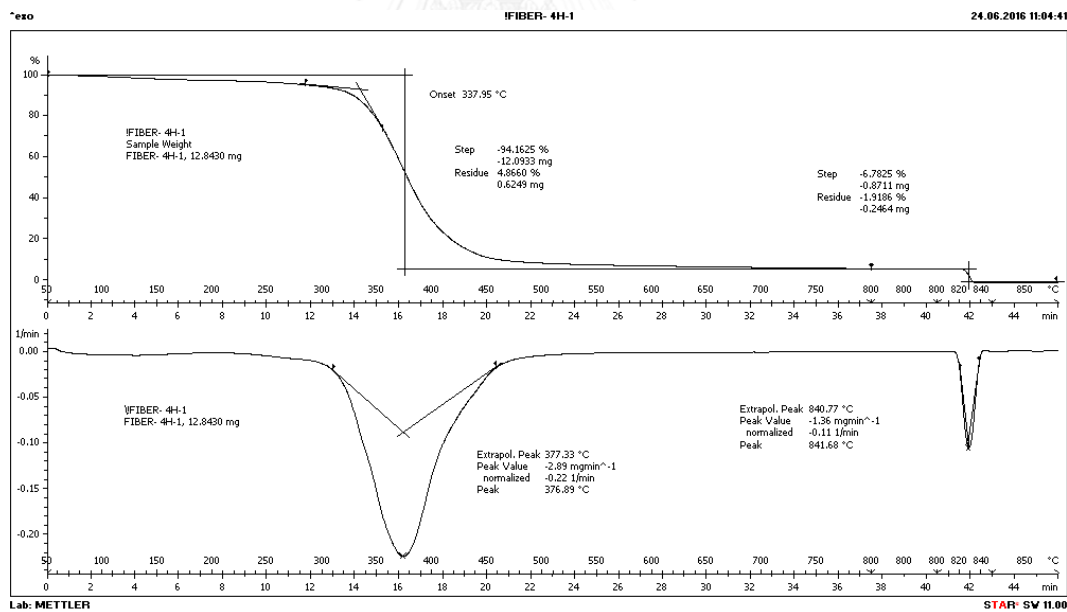
รูปที่ ข-1 TGA เทอร์โมแกรมของอีพ็อกซีบริสุทธิ์



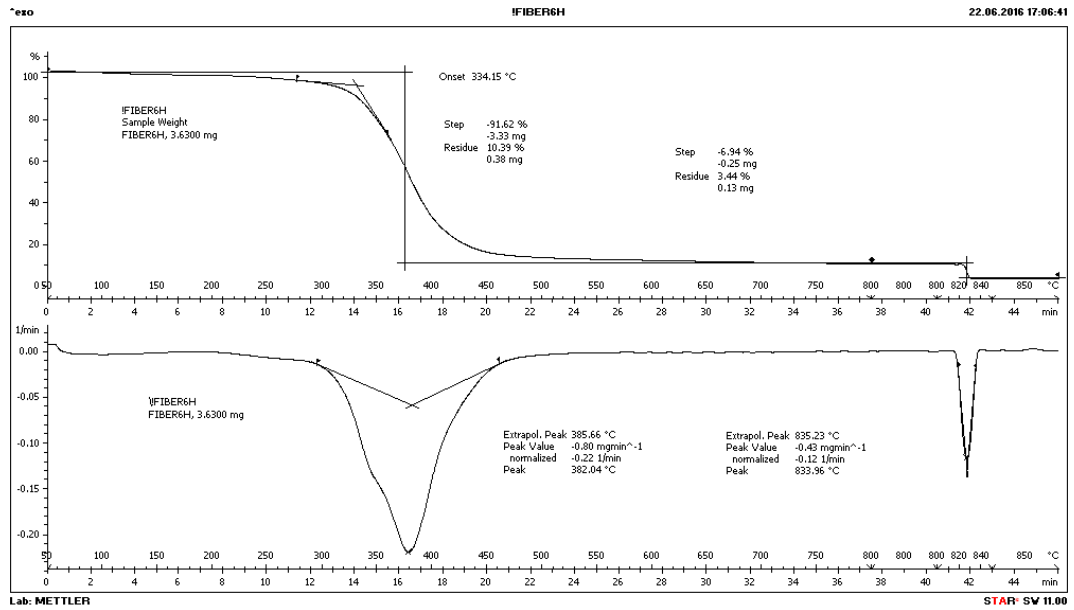
รูปที่ ข-2 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ไม่ผ่านการ
ปรับสภาพ



รูปที่ ข-3 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ข-4 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ ข-5 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ญาณิศา ตีสโร เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

