



สมบัติของเส้นใยไหม ที่ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

PROPERTY OF SILK (*BOMBYX MORI*) GRAFTED BY
2-HYDROXYETHYL METHACRYLATE (HEMA)

นายอภิคุณย์ ชุ่มมงคล รหัส 48365385

ห้องสมุดคณะวิทยาศาสตร์
วันที่รับ..... 13/ก.ค. 2553
เลขทะเบียน..... 15060035
เลขเรียกหนังสือ..... 45.
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 02536

2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อโครงการวิจัย	สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหม ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทา- คริเลต
ผู้ดำเนินการวิจัย	นายอภิคุณย์ ชุ่มมงคล รหัส 48365385
ที่ปรึกษาโครงการวิจัย	อาจารย์ศิริกาญจน์ ชื่นสัมฤทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชื่นสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ
(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ชวลีพรชัย ป่าไร่)

หัวข้อโครงการวิจัย	สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหม ค่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต		
ผู้ดำเนินงานวิจัย	นายอภิดุลย์	ชุ่มมงคล	รหัส 48365385
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ศิริกาญจน์	ชันสัมฤทธิ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2552		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมลอกท้าว ด้วยวิธีการค่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl Methacrylate, HEMA) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย HEMA ที่ใช้ในการค่อกิ่ง คือ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร พบว่าเส้นใยไหมที่ค่อกิ่งด้วย HEMA มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยไหม (%Weight gain) เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ HEMA เพิ่มมากขึ้น ส่วนสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ทำการค่อกิ่งด้วย HEMA ทุกระดับความเข้มข้น จะให้แรงที่ใช้ในการดึง (Load) และมอดุลัสของยัง (Young's Modulus) สูงกว่าเส้นใยไหมก่อนการค่อกิ่ง ส่วนเส้นใยไหมที่ทำการค่อกิ่งด้วย HEMA ทุกระดับความเข้มข้น มีความสามารถเปอร์เซ็นต์การดึงขาด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) ต่ำกว่าเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมก่อนการค่อกิ่งด้วย HEMA ส่วนสมบัติในด้านดูดซับความชื้น (% Moisture regains) พบว่าเส้นใยไหมที่ทำการค่อกิ่งด้วย HEMA ทุกระดับความเข้มข้น จะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นมากกว่าเส้นใยไหมก่อนการค่อกิ่ง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของท่านอาจารย์ ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำ เกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางการวิเคราะห์ต่างๆ ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้ง ภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยม และขอกราบ ขอบพระคุณอย่างสูงยิ่ง

ดร.นพวรรณ โม้ทอง อาจารย์กฤษฎา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่ และ อาจารย์ ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอนโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็น ประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมืออย่างถูกต้องอีก ด้วย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี ที่ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้ผู้จัดทำเป็นคนที่ดีของสังคม

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำ โครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้กำเนิด และสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยใน ครั้งนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ทางผู้จัดทำขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

อภิดุลย์ ชุ่มมงคล

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฌ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	3
1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน.....	3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 ไหม (Silks).....	4
2.2 โครงสร้างของโปรตีนเส้นใยไหม.....	5
2.3 สมบัติของเส้นใยไหม (Properties of Silks).....	9
2.4 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment of Silks).....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	20
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	20
3.3 ขั้นตอนในการวิจัย.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	25
4.1 การลอกกาวยเส้นใยไหม.....	25
4.2 การตอ่กึ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA.....	27
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก ก	48
ภาคผนวก ข.....	52
ภาคผนวก ค.....	55
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 สูตรโครงสร้างของกรโคะมิโนที่พบในเส้นใยไหม.....	8
4.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้นหลังการดอ์ก (% Weight gain) และเปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการดูดซับความชื้น (% Moisture regains) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใย ไหมลอกกาว และเส้นใยไหมดอ์กด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	27
4.2 สรุปตำแหน่งแถบการดูดกลืนของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว.....	34
4.3 สรุปตำแหน่งแถบการดูดกลืนของเส้นใยไหมลอกกาว และไหมที่ทำการดอ์กด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	36
4.4 แรงที่ใช้ในการคัง (Load) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมดอ์ก ด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	37
4.5 เปอร์เซ็นต์การคังบีด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมดอ์กด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	38
4.6 มอดุลัสของยัง (Young's Modulus) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และ เส้นใยไหมดอ์กด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	40
ข.1 ความถี่การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	53
ข.1 (ต่อ) ความถี่การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	54
ค.1 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมดิบ.....	56
ค.2 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมลอกกาว.....	56
ค.3 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ดอ์กด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร.....	57
ค.4 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ดอ์กด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร.....	57
ค.5 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ดอ์กด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร.....	58
ค.6 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ดอ์กด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.8 โมล/ลิตร.....	58

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้าง (ก) โครงสร้าง α -เฮลิกซ์ (ข) โครงสร้าง β -ชีทของพอลิเปปไทด์.....	6
2.2 โครงสร้างสามมิติของเส้นใยไหม.....	7
2.3 ภาพถ่ายเส้นใยไหมภาพ (ก) เป็นภาพตัดขวาง ภาพ (ข) เป็นภาพตามยาว.....	10
2.4 โครงสร้างของเส้นใยไหม.....	10
2.5 รูปโครงสร้างของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต.....	15
3.1 รูปการเตรียมตัวอย่างการทดสอบแรงดึง.....	24
4.1 สันฐานวิทยาของ (ก) เส้นใยไหมดิบที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) เส้นใยไหมลอกกาวที่ กำลังขยาย 500 เท่า (ค) เส้นใยไหมดิบที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ง) เส้นใยไหมลอกกาว ที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....	26
4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความสัมพัทธ์ระหว่างการดูดซับความชื้น (% Moisture regains) ของเส้นใย ไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมดอ์กักด้วย HEMA ที่ความ เข้มข้นต่างๆ.....	28
4.3 สันฐานวิทยาที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก) เส้นใยไหมลอกกาว (ข) HEMA 0.2 โมล/ลิตร (ค) HEMA 0.4 โมล/ลิตร (ง) HEMA 0.6 โมล/ลิตร (จ) HEMA 0.8 โมล/ลิตร.....	30
4.4 สันฐานวิทยาที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ก) เส้นใยไหมลอกกาว (ข) HEMA 0.2 โมล/ลิตร (ค) HEMA 0.4 โมล/ลิตร (ง) HEMA 0.6 โมล/ลิตร (จ) HEMA 0.8 โมล/ลิตร.....	31
4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมดิบ (ข) เส้นใยไหมลอกกาว.....	33
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมลอกกาว (ข) HEMA 0.2 โมล/ลิตร (ค) HEMA 0.4 โมล/ลิตร (ง) HEMA 0.6 โมล/ลิตร (จ) HEMA 0.8 โมล/ลิตร.....	35
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึง (Load) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใย ไหมลอกกาว และเส้นใยไหมดอ์กักด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	37
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมดอ์กักด้วย HEMA.....	39
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ของเส้นใยไหม ดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมดอ์กักด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	41
ก.1 เส้นใยไหมดิบ.....	49
ก.2 เส้นใยไหมลอกกาว.....	49
ก.3 เส้นใยไหมที่ดอ์กักด้วย HEMA 0.2 โมล/ลิตร.....	50

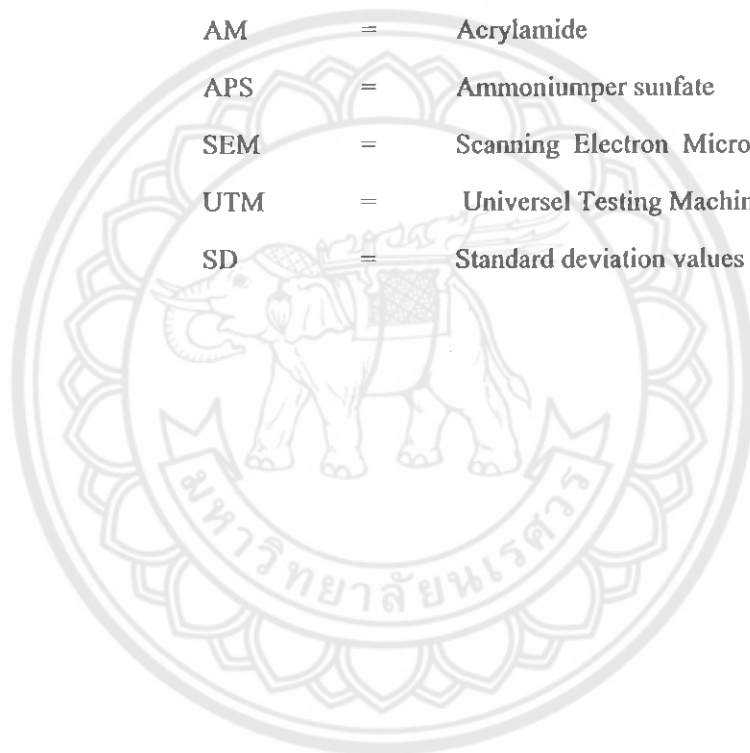
สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4 เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA 0.4 โมล/ลิตร.....	50
ก.5 เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA 0.6 โมล/ลิตร.....	51
ก.6 เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA 0.8 โมล/ลิตร.....	51



สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

MMA	=	Methylmethacrylate
MAA	=	Methacrylamide
HEMA	=	2-Hydroxyethyl methacrylate
ETMA	=	Ethoxyl-ethyl-methacrylate
MAN	=	Methacrylonitrile
VTMSi	=	Vinyltrimethoxysilance
GM	=	Glycidyl methacrylate
AM	=	Acrylamide
APS	=	Ammoniumper sunfate
SEM	=	Scanning Electron Microscope
UTM	=	Universel Testing Machine
SD	=	Standard deviation values



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ไหมเป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เป็นเส้นใยที่ประกอบไปด้วยโปรตีน เช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ แต่ต่างจากเส้นใยขนสัตว์ คือ เส้นใยไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนน้อยมาก และเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้น ลักษณะภายนอกไหมดิบจะเป็นลักษณะของเส้นใยคู่ เกาะติดกันด้วยกาวยไหม มีความมัน นุ่มนวล มีผิวนอกดูเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอ ก่อนนำเส้นใยไหมไปใช้งานนั้น จะต้องทำการลอกกาวยไหมออกก่อน ซึ่งหลังจากลอกเอากาวยไหมออกแล้วจะเป็นเส้นใยเดี่ยวเรียบ ซึ่งพบว่าไหมลอกกาวยให้ข้อด้อยในด้าน การคืนตัวจากการยับ สมบัติการดูดซับความชื้นได้น้อย ความสบายในการสวมใส่ ทนต่อแรงดึงต่ำ มีการทิ้งตัวที่ไม่ดี ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุง สมบัติ ต่างๆเหล่านี้ โดยการดัดแปลงด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Modification) เช่น การใช้ พอลิเมอร์ ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft Copolymerization) และ ไวนิลมอนอเมอร์ที่นิยมใช้ เช่น เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate, MMA), เมทาคริลามิด (Methacrylamide, MAA) 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA), เอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Ethoxyethyl methacrylate, ETMA), เมทาคริโนไทรล์ (Methacrylonitrile, MAN) และ ไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน (Vinyltrimethoxysilane, VTMSi) เป็นต้น ซึ่งเมื่อทำการดัดแปลงแล้ว จะทำให้เส้นใยไหม มีสมบัติในด้านต่างๆ ดีขึ้น เช่น การคืนตัวจากการยับที่ดีขึ้น สมบัติการดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ความสบายในการสวมใส่ ทนต่อแรงดึง มีการทิ้งตัวที่ดี การทนต่อแสง และการคงทนต่อสีของที่ดีขึ้น ซึ่งสมบัติของเส้นใยไหมจะดีขึ้นในลักษณะใดขึ้นอยู่กับชนิดของไวนิลมอนอเมอร์ที่ใช้ ว่ามีคุณสมบัติเด่นในด้านใด [1]

สำหรับการปรับปรุงเส้นใยไหมด้วย HEMA ซึ่งคาดว่าทำให้เส้นใยไหมมีสมบัติเชิงกล และการดูดซับความชื้นที่ดีขึ้น ขณะที่เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA จะสามารถช่วยปรับปรุงความสบายของผ้าไหม เพราะ HEMA มีส่วนที่ชอบน้ำสูง นอกจากนี้ HEMA ยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เพราะมีการนำ HEMA ไปประยุกต์ใช้ในการทำวัสดุทางการแพทย์ เช่น คอนแทคเลนส์ ชนิดที่ให้ออกทุกวัน (Daily wear contact lens) และกระจกตาเทียม เป็นต้น [2] เพราะสมบัติทางกายภาพของ HEMA ซึ่งเป็นวัสดุใส อ่อนนุ่ม และเมื่อนำมาอยู่ด้วยจะดูดซับน้ำไว้ได้ถึง 40% แต่ตัว HEMA ไม่ละลายน้ำ เพราะเกิดการเชื่อม โขงแบบ 3 มิติ ทำให้แรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ นอกจากนี้ HEMA ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม [3]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการต่อกิ่งเส้นใยไหมลอกกาวด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ เพื่อศึกษา สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และการดูดซับความชื้น ของเส้นใยไหมที่ ลอกกาว และเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA แล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมด้วยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมที่ได้หลังจากการต่อกิ่งด้วย HEMA

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

เส้นใยไหมที่มีการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA

1.5 ขอบเขตการทำโครงการ

1.5.1 ศึกษาผลของการปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร

1.5.2 ศึกษาสมบัติของเส้นใยไหมก่อนและหลังการต่อกิ่งด้วย HEMA ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

1.6.1 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.2 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ไหม (Silks)

เส้นใยไหมได้ชื่อว่าเป็น ราชนิแห่งเส้นใย เนื่องจากไหมเป็นเส้นใยที่มีเอกลักษณ์ไม่เหมือนเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ มีความสวยงาม หรุกร และมีความค่าด้วยการที่เส้นใยไหมมีความมันเงา นุ่มนวล และมีการทิ้งตัวที่ดี ดุจจับความชื้นได้ดี แห้งง่ายทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบาย

เส้นใยไหม เป็นเส้นใยที่ได้จาก โปรตีนที่หนอนไหมขับออกมา เพื่อป้องกันตัวเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยไหมที่ได้มีความยาวต่อเนื่อง (Filaments) เส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติ ที่ได้จากโปรตีน เช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ คือ เส้นใยไหมมีปริมาณซัลเฟอร์เล็กน้อยมาก โดยทั่วไปสามารถจำแนกไหมออกเป็นสองชนิดดังนี้ คือ

2.1.1 ไหมเลี้ยง (Mulberry silk) เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงโดยให้อาหาร คือ ใบหม่อน (Mulberry leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้มีสีค่อนข้างขาว และหลังจากลอกกาวจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2.1.2 ไหมป่า (Wild silk) เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยง โดยปกติไหมทาช่า (Tussah silk) จะเป็นตัวแทนของกลุ่มไหมชนิดนี้ ไหมทาช่า มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีน และอินเดีย เลี้ยงตัวเองด้วยใบไธส ซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยไหมที่มีสีน้ำตาลหยาบ และ ไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับเส้นใยไหมที่ได้จากการเลี้ยง

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าพันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุดคือไหมพันธุ์ *Bombyx mori* ซึ่งในประเทศไทยส่วนมากถือว่าเป็นไหมเลี้ยง ซึ่งเป็นตัวอ่อนของผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่ง เป็นแมลงในอันดับ เลพิโดพเทอร่า มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* มีชื่อสามัญว่า Silkworm วงศ์ *Bombicidae* เป็นพันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุด นิยมเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันการเลี้ยงไหม และการผลิตไหม ได้รับการส่งเสริมให้ทำเป็นระบบอุตสาหกรรม การเลี้ยงไหม (Sericulture) ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่น แต่มีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากเส้นใยไหมมีสีเหลือง และค่อนข้างหยาบไหมไทยมีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมประมาณมากถึง 38 % มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ ซึ่งมีกาวไหมเพียง 20-25 % เท่านั้น ทำให้เส้นใยไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อทอผ้าไหมไทยมีลักษณะที่หรุกร สวยงาม มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ซึ่งเส้นใยอื่นไม่สามารถเทียบได้ มีสมบัติเหมาะแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบาย ความสวยงาม ดูมีค่า มีความทนทาน และแข็งแรงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด [4,5]

2.2 โครงสร้างของโปรตีนไหม

จำแนกโครงสร้างของโปรตีนได้เป็น 4 แบบ คือ

2.2.1 โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Structure) โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างแบบพื้นฐานที่สุด หมายถึง โครงสร้างโมเลกุลเส้นยาวที่ต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ และรวมถึงพันธะไดซัลไฟด์

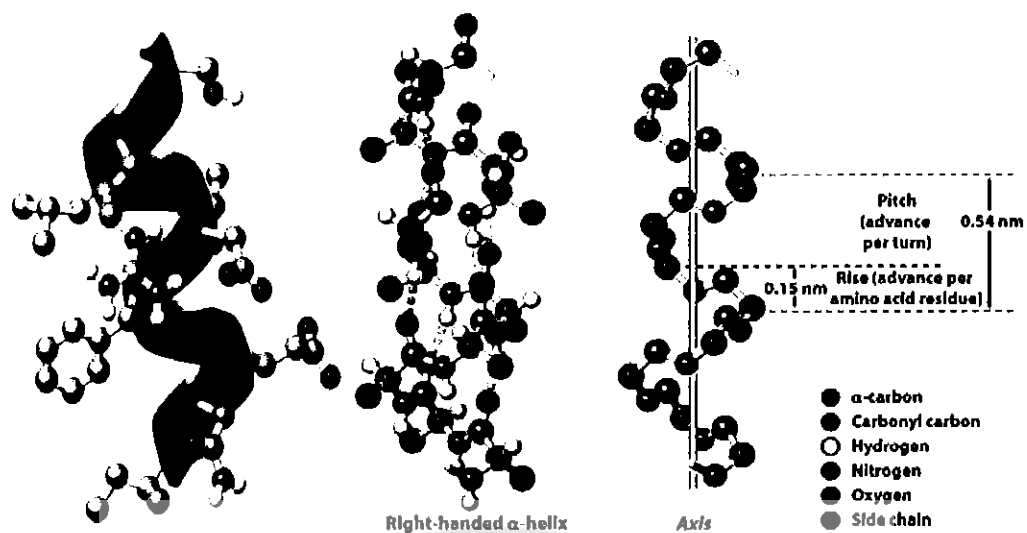
2.2.2 โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Structure) โดยทั่วไปโมเลกุลที่เป็นเส้นยาว จะไม่คงอยู่ในสภาพที่เป็นเส้นยาว แต่จะจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นโครงทุติยภูมิ 2 แบบ คือ แอลฟาเฮลิกซ์ และแผ่นพับแบบเบต้า

1. แอลฟาเฮลิกซ์ (α - Helix) สายโซ่ยาวจะขดตัว โดยมีหมู่อะตอมไฮโดรเจนซึ่งออกด้านนอก แรงพันธะไฮโดรเจนระหว่าง ออกซิเจน (O) ของหมู่คาร์บอนิล และ H ของ — NH — จะยึดโมเลกุลไว้มีจำนวนกรดอะมิโน 3.6 ตัว ในแต่ละรอบของเฮลิกซ์ ตัวอย่างโปรตีนที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ myosin โปรตีนของกล้ามเนื้อ α - keratin ในผม ขนสัตว์ เล็บ รูปที่ 2.1 (ก)

2. แผ่นพับแบบเบต้า (β - Pleated sheet) โมเลกุลจะมาเรียงตัวกันเป็นแผ่นขนานกัน แรงพันธะไฮโดรเจนระหว่างแผ่น โมเลกุลที่ขนานกัน เป็นแรงยึดโมเลกุลไว้ด้วยกัน หมู่ R จะชี้ขึ้นด้านบน และด้านล่างของแผ่นที่ขนานกัน พบโครงสร้างชนิดนี้ในไฟโบรอิน รูปที่ 2.1 (ข)

2.2.3 โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Structure) โครงสร้างนี้เกิดจากการบิดตัว หรือม้วนตัวของ โครงสร้างทุติยภูมิ พบว่าโกลบูลาร์โปรตีนมีการขดตัวมากกว่าไฟบรัสโปรตีน การม้วนตัวจะเป็นไปในลักษณะเก็บกลุ่มไฮโดรโฟบิกเข้าด้านใน และกลุ่มไฮโดรฟิลิก ชี้ออกด้านนอก ตัวอย่าง เช่น myoglobin ในกล้ามเนื้อ

2.2.4 โครงสร้างจตุรภูมิ (Quaternary Structure) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากพอลิเพปไทด์หลายเส้นมารวมกัน ซึ่งแต่ละเส้นจะมีโครงสร้างของตัวเอง ทั้งแบบ ปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และ ตติยภูมิ ตัวอย่าง เช่น ฮีโมโกลบิน ประกอบด้วยหน่วยย่อย 4 หน่วย แรงที่ยึดเหนี่ยวหน่วยย่อยเหล่านี้ไว้ด้วยกันเป็นแรงพันธะไฮโดรเจน และแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกัน [1]



(ก)

(a) Top view

Amino
terminus

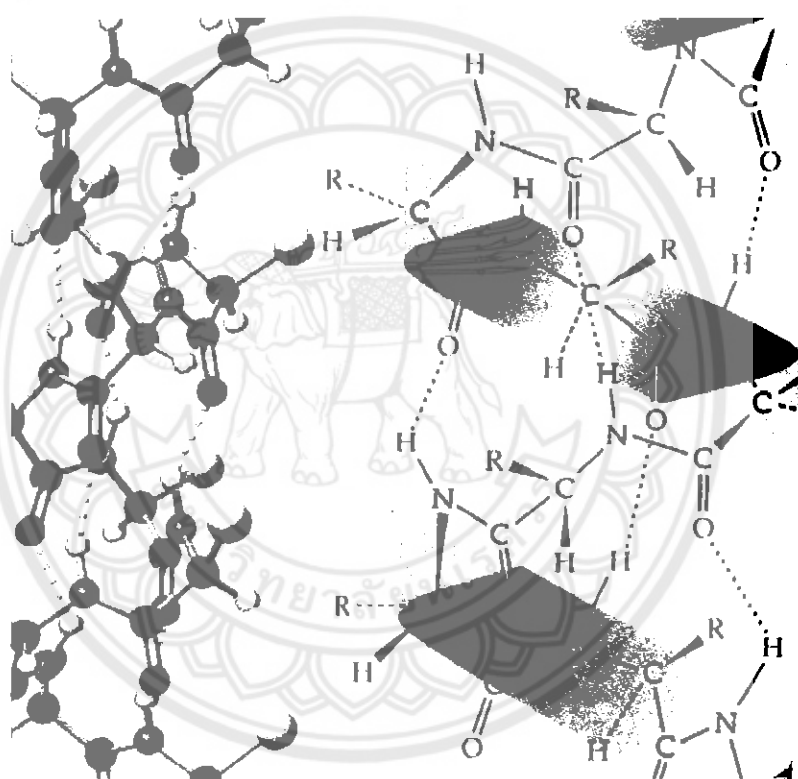
(b) Side view

Carboxyl
terminus

(ข)

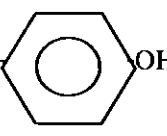
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้าง (ก) โครงสร้าง α -เฮลิคซ์ (ข) โครงสร้าง β -ชีทของพอลิเพปไทด์ [7]

2.2.5 โครงสร้างของเส้นใยไหม (Structure of Silk) โปรตีนเส้นใยไหมมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่าไฟโบรอิน (Fibroin) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78 % ของน้ำหนักเส้นใยไหมดิบ) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด กรดอะมิโนหลักๆ ที่พบในเส้นใยไหม ได้แก่ ไกลซีน (Glycine 40%), อะลานีน (Alanine 29 %) และเซรีน (Serine 12 %) แต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R (โซ่ข้าง) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวที่เรียกว่า โพลีเพปไทด์ เป็นเส้นใยยาวที่ขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็งแรงเหนียว และอาจยืดหยุ่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [1]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสามมิติของเส้นใยไหม [10]

ตารางที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนที่พบในเส้นใยไหม [1]

ชนิดของกรดอะมิโน	R(โซ่ข้าง)	ชื่อ	สัญลักษณ์
กรดอะมิโนที่เป็นกลาง	-H	ไกลซีน (Glycine)	Gly , G
	-CH ₃	อะลานีน (Alanine)	Ala , A
กรดอะมิโนที่โซ่ข้างมีหมู่ OH	-CH ₂ OH	เซรีน (Serine)	Ser , S
	- CH ₂ 	ไทโรซีน (Tyrosine)	Tyr , Y
กรดอะมิโนที่เป็นกรด	-CH ₂ CH ₂ COOH	กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	Glu , E
กรดอะมิโนที่เป็นเบส	-(CH ₂) ₄ NH ₂	ไลซีน (Lysine)	Lys , K

โปรตีนทั้งหลายในธรรมชาติประกอบด้วยสายพอลิเพปไทด์ ที่มีโครงสร้างทุติยภูมิ โดยปกติในไฟโบรอินของเส้นใยไหมมักพบ โครงสร้างชนิดแบบจิบนี้ ซึ่งแผ่นจิบแบบเบต้ามีด้วยกัน 2 โครงสร้าง คือ แผ่นจิบแบบเบต้าที่สายเพปไทด์ทั้งสอง มีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C ที่อยู่ตรงข้ามกัน เรียกว่า แผ่นจิบแบบแอนติพาราเลล (Antiparallel pleated sheet structure) และแผ่นจิบแบบเบต้าที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C เหมือนกันเรียกว่า แผ่นจิบแบบพาราเลล (Parallel pleated sheet structure) ไฟโบรอินของไหมส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแผ่นจิบแบบแอนติพาราเลล [1]

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไฟโบรอินทำได้ยาก เนื่องจากไฟโบรอินไม่ละลายในสารละลายทั่วไป แต่ละลายในสารละลายบางชนิดเท่านั้น เช่น Cupri ethylenediamine หรือในสารละลายเข้มข้น Lithium iodide หรือ Thiocyanate จากการใช้สารละลายเหล่านี้ร่วมกับการใช้หลักการตกตะกอนในเครื่องเหวี่ยงสุญญากาศ (Ultracentrifuge) สามารถคำนวณน้ำหนักได้ประมาณ 84,000 กรัม/ โมล แต่ถ้าคำนวณจากการอาศัยการวัดสมบัติทางความหนืดจะได้น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50,000 กรัม/โมล หรือมีผู้ใช้การคำนวณโดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Terminal amino acid พบว่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 80,000-100,000 กรัม/โมล

2.3 สมบัติของเส้นใยไหม (Properties of Silks)

สมบัติของเส้นใยไหมจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการใช้งานเฉพาะด้านของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นต้องเข้าใจและเลือกใช้เส้นใยไหมให้เหมาะสมกับงาน โดยทั่วไปสมบัติของเส้นใยไหมจะถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาเส้นใยไหมออกได้เป็นสองส่วนคือ สมบัติทางกายภาพ และ สมบัติทางเคมี

2.3.1 สมบัติกายภาพของเส้นใยไหม

1.ลักษณะที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์และรูปร่าง ไหมเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้นมีความยาวประมาณ 1300-2000 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9-11 ไมครอน

สีของเส้นใยไหมดิบจะมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล โดยไหมบ้านมีสีตั้งแต่สีเหลืองจนถึงสีขาว ขณะที่ไหมป่ามีสีเหลืองเทา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ สภาพแวดล้อม และอาหารที่ใช้เลี้ยงดู

เส้นใยไหมที่นำไปใช้ทอผ้านั้น เกิดจากการพันของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อมภายในตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัย โดยส่วนที่เป็นของเหลวหนืด คือ ไฟโบรอิน จะถูกเคลือบด้วยโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เซรีซิน ซึ่งเป็นกาวไหมที่ทำให้เส้นใย 2 เส้น ติดกันเมื่อโปรตีนทั้งสองชนิดสัมผัสกับอากาศจะเกิดการแข็งตัวทำให้เส้นใยยึดติดกัน กลายเป็นเส้นใยไหมยาวต่อเนื่อง และเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นรอยแตกตามความยาวของเส้นใยไหมด้านตัดขวางจะมีลักษณะรี ส่วนนอกของเส้นใยไหมเป็นกาวไหมที่หุ้มโปรตีนไฟโบรอิน คล้ายรูปสามเหลี่ยมเรียงคู่กัน ดังแสดงให้เห็นในภาพตัดขวาง และภาพตัดตามยาวของเส้นใยไหมทั้งสองชนิด (รูปที่ 2.3 (ก) และ (ข)) และสำหรับเส้นใยไหมป่าจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอตลอดความยาว ทำให้ดูคล้ายลินินและเส้นใยไหมจะมีความหยابกระด้าง ไม่เรียบค่อนข้างจะไม่มันเงา เมื่อเทียบกับเส้นใยไหมบอมบิกซ์โมรี [1]



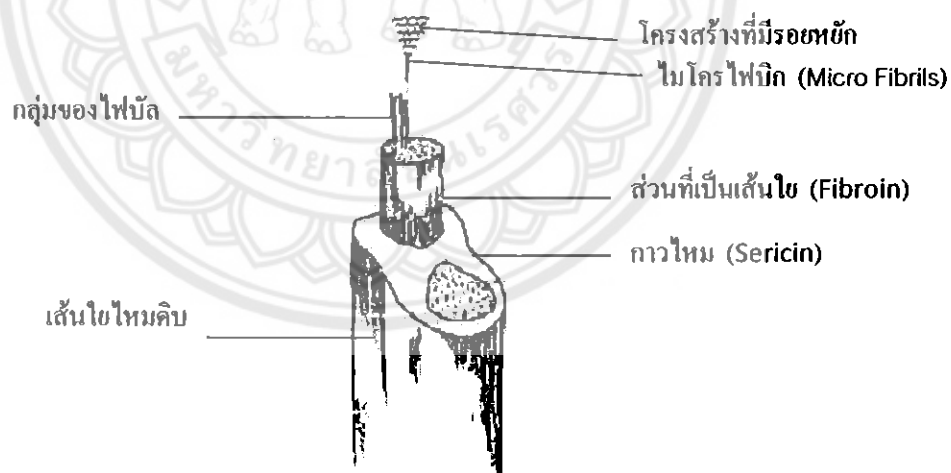
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายเส้นใยไหมภาพ (ก) เป็นภาพตัดขวาง ภาพ (ข) เป็นภาพตามยาว [14]

หลังจากการลอกถาวไหมแล้วเส้นใยไหมที่เป็นลักษณะสามเหลี่ยมปลายมน ทั้งสองเส้นจะแยกตัวออกมาทำให้เส้นใยไหมมีรูปร่างต่างจากเส้นใยไหมดิบ คือความละเอียดกว่า และเส้นใยไหมมีความมันเงาสูงกว่า โดยรายละเอียดของโครงสร้างของเส้นใยไหมดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเส้นใยไหม [5]

2. ความแข็งแรง ไหมมีความแข็งแรงสูงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด ด้วยที่ผิวของไหมเรียบมันจึงช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการขัดถู สามารถออกแบบผ้าไหมให้มีโครงสร้างเบาบาง และคงทนเนื่องจากความละเอียดของเส้นใยไหมมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด อยู่ที่ 3.5-5.0 g/d ในขณะที่แห้ง และจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเปียก (ประมาณ 15-25 %)

3. ความยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงไปบ้างตามชนิดของพันธุ์และการเจริญเติบโตได้ดีถึง 20% ของความยาวเดิม ไหมมีความยืดหยุ่นไม่ดีเมื่อเทียบกับขนสัตว์ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของไหมไม่มีพันธะมาจับเชื่อมด้านข้าง เป็นโครงข่าย ดังนั้นเมื่อถูกยืดจึงไม่สามารถหดกลับคืนสภาพเดิมได้

4. การคืนตัวจากแรงอัด ไหมทนต่อการยืดหดได้ดีเมื่อทำการซักผ้าจะหดแต่เมื่อคั่งและรีดจะกลับรูปเดิม ไม่เกิดการยับย่นได้ง่าย

5. การดูดซับความชื้น ไหมสามารถดูดซับความชื้นได้ดีในภาวะมาตรฐานสามารถดูดซับความชื้นได้ถึง 11% ทำให้รับสีย้อมและสีพิมพ์ได้ดี และเมื่อนำมาใช้สวมใส่จะรู้สึกสบาย ไม่ระคายเคืองผิว เนื่องจากผ้าไหมเป็นตัวนำความร้อนไม่ดี จึงรักษาความอบอุ่นได้นานเหมาะแก่การนำไปทำผ้าพันคอ ชุดสูท เป็นต้น

6. ความร้อน ไหมสามารถทนความร้อนได้ประมาณ 340 °F หรือ 170 °C ในช่วงสั้นๆ หลังจากนั้นจะเกิดการสลายตัว แต่เมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเลตนานจะมีค่าความแข็งแรงลดลง

7. ความถ่วงจำเพาะ ไหมมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.32-1.33 แต่มีการทิ้งตัวดี แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักไหมจะมีค่าประมาณ 1.60

2.3.2 สมบัติทางเคมีของเส้นใยไหม (Chemical Properties of Silks)

เนื่องจากการใช้งานของผ้าไหมมีโอกาที่จะสัมผัสสารเคมี อุณหภูมิ แสงแดด และสภาวะแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพหรือสมบัติของไหมเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงมีการศึกษาสมบัติทางเคมีเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมดังนี้

1. กรดและด่าง สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสของพอลิเพปไทด์ในเส้นใยไหมค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4-8 จะทำให้เส้นใยไหมเสียหายน้อยมาก

กรดจะทำให้พันธะเพปไทด์ขาดออกจากกัน กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจะละลายเส้นใยไหมได้ กรดไนตริกทำให้เส้นใยไหมเหลือง ในขณะที่กรดเจือจางจะไม่ทำลายเส้นใยไหม

ด่างจะตัดปลายของพันธะเพปไทด์ออกก่อน โดยด่างโซดาไฟเข้มข้นจะละลายเส้นใยไหมทันทีส่วนด่างอ่อนเช่น สบู่ บอเร็็กซ์ หรือแอมโมเนีย จะละลายแค่กาวยไหมแต่ถ้าต้มให้เค็มนานๆ อาจละลายเส้นใยไหมได้

2. สารออกซิไดส์และสารรีดิวซ์ เส้นใยไหมไม่ทนทานต่อสารออกซิไดส์ ดังนั้น เวลาฟอกเส้นใยไหมต้องระวังการใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ที่ใช้สำหรับฟอกไหม แต่เส้นใยไหมจะทนทานต่อสารรีดิวซ์ได้ดี เช่น โซเดียมไฮโครซัลไฟท์

3. ไหมถูกทำลายได้ สามารถทำลายได้ด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือ คลอไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหนือ น้ำยาคับกลืน และ น้ำเกลือทั่วไป โดยเฉพาะเหงื่อจะทำให้ผ้าไหมติดคราบ ดังนั้นการใช้ผลิตภัณฑ์ไหมที่ต้องสัมผัสผิวหนัง หลังการใช้งานทุกครั้งจะต้องทำความสะอาด

4. สารละลายอินทรีย์ ส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ไหมจะทำการซักแห้งอยู่เสมอเนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยไหม หรือสีย้อมทำให้ไหมสามารถทนสารละลายอินทรีย์ทุกชนิด

5. สารซักฟอก ไหมทนต่อการซักฟอกกล้ายขนสัตว์ แต่ถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภท ออกซิไดส์ เช่น พวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรท์ผสมอยู่ เพราะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยไหมลดลง ควรใช้สารซักฟอกประเภทไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ หรือ โซเดียมเปอร์บอเรต จะไม่เกิดผลเสียต่อไหม

6. แสงแดดและความร้อน แสงแดดและความร้อนสูงเป็นเวลานานๆ จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยไหมลดลง และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเนื่องจากทำให้โปรตีนเกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น

เนื่องจากไหมลอกกาวมีข้อด้อยในด้าน การคืนตัวจากการยับ สมบัติการดูดซับความชื้นได้น้อย ความไม่สบายในการสวมใส่ ทนต่อแรงดึงต่ำ มีการทิ้งตัวที่ไม่ดี เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เหล่านี้โดยการดัดแปลงด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Modification) เช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft Copolymerization) [1]

2.4 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment of Silks)

ไหมดิบที่ได้จากรังไหมในแต่ละรังมีความแข็งแรงกระด้างและให้สัมผัสที่ไม่ดี เนื่องจากเส้นใยไหมดิบมีองค์ประกอบของกาวไหม และสารอื่นๆ เคลือบอยู่ ดังนั้นก่อนนำไหมไปใช้งาน จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหม ก่อนนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการลอกกาวไหม และการตกแต่งสำเร็จ เช่น การตกแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อน การตกแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการใช้งาน เป็นต้น

2.4.1 การลอกกาว (Degumming)

เส้นใยไหมเมื่อสาวออกจากรัง เป็นเส้นใยกระด้างและแข็ง เพราะมีกาวหุ้มอยู่ ฟอกออกได้ด้วยสบู่อะไรก็ได้ที่นุ่มเป็นมันทำให้น้ำหนักไหมลดลงประมาณ 25% มีสีขาวขุ่นหรือสีครีม และเพื่อเพิ่มความสามารถในการย้อมสีเส้นใยไหม จะต้องมีการฟอกขาว เพื่อกำจัดสีธรรมชาติออกไปด้วย

การลอกกาวยออกจากเส้นใยไหมดิบเป็นการลอกกาวเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยไหมเพื่อให้เส้นใยไหมมีความมันเงามากขึ้น มีวิธีใช้อยู่ทั่วไปดังนี้

1. การลอกกาวด้วยสบู่

การลอกกาวด้วยสบู่เริ่มจากการแช่เส้นใยไหมดิบที่อุณหภูมิ 40 °C 30 นาที แล้วเติมสบู่ 15-20 % โดยน้ำหนักของเส้นใย และต้มต่อเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ทำให้ได้เส้นใยไหมที่เงางามและเรียบสวย ข้อเสียของวิธีนี้คือ ถ้าใช้น้ำกระด้างจะทำให้เกิดโคลสบู่ที่เกิดจากแคลเซียมไอออนในน้ำเช่น แคลเซียม แมกนีเซียมและเหล็กทำให้เส้นใยที่ได้มีลักษณะการลอกกาวที่ไม่สม่ำเสมอ และมีสีหมองคล้ำ

2. การลอกกาวด้วยโซดา

สารละลายโซดาที่ใช้ทำการลอกกาวไหมที่นิยมใช้คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำอุ่น 40-50 °C และน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง วิธีนี้สามารถลอกกาวได้สม่ำเสมอแต่มีข้อเสียคือ สารเคมีที่ใช้ทำให้เส้นใยไหมมีสมบัติเชิงกลลดลง

3. การลอกกาวด้วยเอนไซม์

เอนไซม์ที่ใช้ในการลอกกาว คือ เอนไซม์ โปรตีเอส (Protease enzyme) ชนิดค่างที่มีค่า pH 9.0-10.5 ที่อุณหภูมิ 40-65 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำอุ่น 40-50 °C และน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง เอนไซม์สามารถลอกกาวเส้นใยไหมได้อย่างสม่ำเสมอ แต่ข้อเสียคือ เอนไซม์ที่ใช้มีราคาแพง และมีกลิ่นรุนแรง

4. การลอกกาวด้วยกรด

การนำเส้นใยไหมไปต้มในสารละลายที่เป็นกรด แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากปัญหาการควบคุมคุณภาพของไหมลอกกาว

5. การลอกกาวด้วยสบู่-โซดา

การลอกกาวด้วยสบู่ผสมโซดาจะใช้สบู่ 8-15 % โดยน้ำหนักของเส้นใยไหม และโซเดียมคาร์บอเนต 5-8 % โดยน้ำหนักของเส้นใยไหม ใช้อัตราส่วนของวัสดุต่อของเหลวเป็น 1:50 ที่อุณหภูมิ 90 °C ใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยไหมมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ที่เป็นด่างอ่อนกว่าที่อุณหภูมิ 40-50 °C ตามด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง วิธีนี้จัดว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่ง ทำให้ได้เส้นใยไหมที่ขาวและมีความสม่ำเสมอในการลอกกาวมากขึ้น และช่วยลดข้อเสียในการลอกกาวด้วยสบู่จากการใช้สารลดแรงตึงผิว และสารลดความกระด้างของน้ำ [4, 5]

2.4.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีทางเคมี (Chemical finishing)

การตกแต่งทางเคมีเป็นการตกแต่งโดยใช้สารเคมีมาทำปฏิกิริยากับเส้นใยไหม และเกิดการเปลี่ยนแปลงบางประการขึ้นภายในเส้นใยไหม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรทำให้เส้นใยไหม มีสมบัติบางประการดีขึ้น เช่น เส้นใยไหมเมื่อโดนแสงแดด และความร้อนสูงเป็นเวลานานจะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยไหมลดลง และเปลี่ยนเป็นสีเหลือง สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการปรับปรุงทางเคมี

การตกแต่งสำเร็จด้วยการต่อกิ่งมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาสำคัญ 2 กลไก คือ การปรับปรุงสมบัติเส้นใยไหมด้วยการต่อกิ่งมอนอเมอร์ และการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ[16]

1. การปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยการต่อกิ่งแบบมอนอเมอร์ (Graft Copolymerization)

การปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยการต่อกิ่งแบบมอนอเมอร์เป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ที่เป็นข้อด้อยของไหม เช่น การคืนตัวจากการยับ ความทนทานต่อการขัดถู ความคงทนในการติดสีย้อม สมบัติในการซักและสวมใส่ และการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองเมื่อถูกแสง เป็นต้น สมบัติเหล่านี้ปรับปรุงได้โดย 2 วิธีแตกต่างกัน คือ

1) การ โคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบต่อกิ่งด้วย ค่ายไวนิลมอนอเมอร์ การเกิดพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) หมายถึงการนำพอลิเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาพอลิเมอร์ไรเซชันเข้าด้วยกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติพอลิเมอร์ให้ดีกว่าการใช้มอนอเมอร์เพียงอย่างเดียว พอลิเมอร์ร่วมที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าโฮโมพอลิเมอร์เดิม และได้ผลผลิตใหม่ตามคุณสมบัติที่ต้องการมากขึ้น ที่สำคัญคือ มอนอเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าจะพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ไม่โซ่แบบขึ้น นั่นคือพอลิเมอร์ไรเซชันต้องเกิดกับพันธะคู่ เรียกว่าไวนิลมอนอเมอร์ การเกิดพอลิเมอร์ร่วมสามารถให้ผลผลิตที่มีสมบัติแตกต่างกันมากมายโดยไม่จำกัด เช่น พอลิสไตรีน ซึ่งเป็นพลาสติกที่แข็งแรง ทนทานแรงกระแทกดีมาก แต่ถ้าผสมสไตรีนด้วย อะครีโลไนไตรล์ และบิวตะไดอินจะทำให้ได้ผลผลิตที่เป็นอีลาสโตเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากบิวตะไดอินและจะมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น ทนต่อตัวทำละลายดีขึ้นจากการเติมอะครีโลไนไตรล์ลงไป

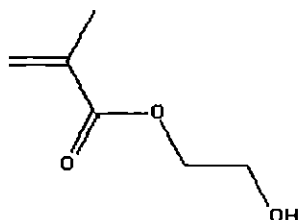
พอลิเมอร์ร่วมสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะการจัดเรียงตัวของหน่วยที่ซ้ำๆ กันในโมเลกุลได้ ประเภท คือ

- พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random Copolymer)
- พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ (Alternating Copolymer)
- พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (Block Copolymer)
- พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft Copolymer)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา การปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยการต่อกิ่งแบบมอนอเมอร์ โดยเลือกใช้มอนอเมอร์ชนิด HEMA มาทำการศึกษา [12]

2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate HEMA)

2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) มีสูตรโครงสร้างคือ $C_6H_{10}O_3$ เป็นมอนอเมอร์ที่ใช้ร่วมกับมอนอเมอร์ หรือพอลิเมอร์อื่นเพื่อผลิตพลาสติกที่ใช้ในการแพทย์ และในโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.5 รูปโครงสร้างของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต [11]

สมบัติของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA)

- สมบัติทางกายภาพ
 - ของเหลว
 - สี ไม่มีสี
 - กลิ่นคล้ายผลไม้
 - ค่าความถ่วงจำเพาะ : 1.0340
- สมบัติทางเคมี
 - จุดเดือด 205-208 °C
 - จุดหลอมเหลว -12 °C
 - ความเป็นกรดด่าง (pH) 4
 - ความหนืด 9 MPa/sec
 - ความสามารถในการละลายน้ำที่ (กรัม/100 มล.) ที่อุณหภูมิ 20 °C
 - สารนี้ไวต่อแสง ความชื้น และความร้อน
- การนำไปใช้งาน
 - ใช้ทำวัสดุที่ใช้กับสิ่งมีชีวิต
 - ใช้ทำคอนแทกเลนส์
 - ใช้ทำวัสดุทางการแพทย์

HEMA จะสามารถปรับปรุงสมบัติการคืนตัวจากการยับ ลดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองเมื่อโดนแสงได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหม จะทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนที่เป็น

เบส เกิดพันธะเคมีกับเส้นใยไหม และจะทำปฏิกิริยากับโซ่กิ่งของกรดอะมิโนหลายชนิด ทำให้ไหมที่มีความทนทานต่อการครด และค่า่งมากขึ้น เป็นต้น

2) ใช้รีเอเจนต์ปรับปรุงสมบัติทางเคมี เช่น ใช้ฮิพอกโซไซด์ปรับปรุงสมบัติการเชื่อมสี ด้วยสีแอซิด ความยืดหยุ่นและความคงทนติดสีเชื่อม การชัก เป็นต้น โดยฮิพอกโซไซด์จะทำปฏิกิริยากับไทโรซีนรวมทั้งกรดอะมิโนทั้งกรดและเบสที่มีในไหม สามารถปรับปรุงสมบัติการคืนตัวจากการยับยลดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองเมื่อโดนแสงได้ โดยที่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหม โดยโคเบตริกแอซิดแอนไฮไดรด์ จะทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนที่เป็นเบสเกิดพันธะเคมีกับเส้นใยไหม และไอโซไซยาเนต จะทำปฏิกิริยากับโซ่กิ่งของกรดอะมิโนหลายชนิด ทำให้เส้นใยไหมมีความทนต่อการครด และค่า่งมากขึ้น เป็นต้น [11]

2.การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ (Free Radical Polymerization)

พอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมจะเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่อยู่ใน โมเลกุล และมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาชนิดนี้ได้เร็วจะเป็นพวกมอนอเมอร์ที่มีหมู่แทนที่ 2 หมู่ หรือหมู่ที่ดึงอิเล็กตรอนอยู่ที่ตำแหน่งแอลฟาคาบอน เช่น เอทิลีน (Ethylene), ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride) เมทาคริเลต (Mecithacrylate) และอะคริลาไมด์ (Acrylamide) เป็นต้น การเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะต้องอาศัยตัวเริ่มต้น ซึ่งอาจจะเป็นฟรีแรดิคัล ไอออนบวก หรือ ไอออนลบ ก็ได้แต่โดยทั่วไปนิยมใช้สารพวกเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวเริ่มต้นการแตกตัวเป็นฟรีแรดิคัลสามารถแตกตัวได้ 4 วิธีคือ

- (ก) การเริ่มต้น โดยความร้อน
- (ข) การเกิดฟรีแรดิคัล โดยอาศัยปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์
- (ค) การเริ่มต้นฟรีแรดิคัล โดยรังสี
- (ง) การเริ่มต้นฟรีแรดิคัล โดยแสง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กุลชล บุญสวัสดิ์ [1] การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และการยึดติดสีของเส้นใยไหม ด้วยวิธีการต่อกิ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์ คือ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxy ethyl-methacrylate, HEMA) และ เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) โดยอัตราส่วนที่ใช้ในการต่อกิ่ง คือ 1:20 และ 1:5 ในเวลา 15-180 นาที พบว่า เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมหลังการต่อกิ่ง (% Weight gain) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน และเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้ง 2 อัตราส่วน มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งมากกว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA นอกจากนี้เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA เกิดแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1724 และ 1741 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นลักษณะเฉพาะของมอนอเมอร์ ส่วนสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่ง มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมลอกขาว แต่สมบัติทางความร้อนของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนั้นเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA และเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA จะมีความสามารถทนต่อการกด และด่างได้สูงที่สุด และในส่วนสมบัติการยึดติดสี และความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมแอซิด สิริแอคทีฟ และสีย้อมขมื่น พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น และเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA มีความคงทนของสีต่อการซัก และมีความคงทนของสีต่อเหงื่อสูงกว่าเส้นใยไหมลอกขาว แต่เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA ที่ย้อมด้วยสีย้อม รีแอคทีฟมีความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกขาว นอกจากนี้เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA ที่ย้อมสีด้วยสีย้อมสังเคราะห์มีความคงทนของสีต่อแสงดี แต่เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA ที่ย้อมสีด้วยสีธรรมชาติมีความคงทนของสีต่อแสงต่ำ

วัฒนา กล้ายรัมย์ [12] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) และเมทาคริลามาย (Methacrylamide, MAA) ในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 พบว่าความสามารถในการต่อกิ่งของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA และเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA ลดลง เมื่ออัตราส่วนของเอทานอลในตัวทำละลายผสมเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการต่อกิ่งของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA และ MAA มีความสามารถในการต่อกิ่งใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนของตัวทำละลายผสม นอกจากนี้สมบัติเชิงกล และ สันฐานวิทยาของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA ในตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วน 25:75 และ 0:100 เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA และเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA กับ MAA ในตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วน 25:75 ให้พื้นที่ผิวที่มีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ เหมาะแก่การนำไปใช้งานในรูปแบบสิ่งทอ แต่

สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งลดลง เมื่อเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาว จากการศึกษาโครงสร้างของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เส้นใยไหมที่ได้มีลักษณะเฉพาะของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการต่อกึ่ง นอกจากนี้เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย MAA ในตัวทำละลายน้ำมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงสุด ส่วนเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งมีความคงทนต่อการกด และค่าสูงขึ้นยกเว้นเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย MAA ที่เปอร์เซ็นต์การต่อกึ่งสูงๆ มีความคงทนต่อค่าลดลง นอกจากนี้เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น ในส่วนของการข้อมสีเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วยสีข้อมจากขมิ้น สีข้อมแอซิด และสีข้อมเบสิกพบว่า เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งมีความสามารถในการดูดซับสี ความคงทนต่อแสง การซัก และแห้งสูงกว่า เส้นใยไหมลอกกาว

M. Tsukada และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วยเอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Ethoxyethyl methacrylate, ETMA) โดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวเริ่มต้นซึ่งทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 60-80 °C ในช่วงเวลา 0-90 นาที และทำการวิเคราะห์ต่างๆ พบว่า ปริมาณ พอลิเมอร์เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 80 °C ในช่วงเวลา 60 นาที เมื่อปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น 40 % มีลักษณะของเม็ดขนาดเล็กรูปร่างไม่สม่ำเสมอของเอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต โอลิโกเมอร์บนผิวเส้นใยไหม และจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยไหม ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy, IR) พบว่า IR สเปกตรัมของไหมปรับปรุงด้วยเอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต ให้แถบการดูดกลืนซ้อนทับกันกับไหมก่อนต่อกึ่ง แสดงว่าโครงสร้างของไหมก่อน และหลังปรับปรุงด้วย เอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต เหมือนกันแสดงให้เห็นถึงการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของ ETMA ภายใน เมทริกซ์เส้นใย ทำให้ความสามารถในการติดสีข้อมของสีข้อมประเภทกรดเพิ่มมากขึ้น เมื่อพอลิเอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต เกิดการต่อกึ่งทางเคมี หรือถูกยึดไว้ภายในบริเวณพื้นผิวของไหม ในขณะที่สมบัติทางความร้อนของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย ETMA ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเส้นใยไหมที่ไม่ได้ปรับปรุง

T. K. Maji และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และความสามารถในการดูดซับความชื้นของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วยเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) ที่ทำการเตรียมในตัวทำละลายแตกต่างกันเช่น เมทานอล ไดเมทิลฟอร์มาลดีไฮด์ อะซิติก แอลกอฮอล์ และความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย MMA มีความยืดหยุ่น และการคืนตัวจากการยับ (work recovery) ดีกว่าไหมที่ไม่ได้ต่อกึ่งเนื่องจากการสะสมของ MMA ภายในเส้นใยไหมทำให้ภายในเส้นใยไหมมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เก็บพลังงานในเส้นใยไหมในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปสูงขึ้น โดยไม่ส่งผลต่อการคลายความเค้น (Stress relaxation) สำหรับค่าเทนาคิตีมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์การต่อกึ่งของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น แต่ การดึงยืด ณ

จุดขาดเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของเส้นใยไหม เมื่อ เติบโตใน
ตัวละลายต่างกัันนั้นพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของไหมที่ไม่ต่อกิ่ง> เมทานอล>
ไคเมทิลฟอร์มาลดีไฮด์>อะซิติก

A.M. Ramadan และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น
ความเข้มข้นมอนอเมอร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา สมบัติทางกายภาพของเส้นไหม เช่น องค์
การคืนตัวจากการยับ ความต้านทานการฉีก และความสามารถในการดูดซับความชื้นโดยใช้
เทคนิคการต่อกิ่งผ้าไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์ เช่น ไกลซิดิลเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate,
GM) และ อะคริลาไมด์ (Acrylamide, AM) เพื่อเพิ่มน้ำหนัก และปรับปรุงของไหมโดยมีตัวเริ่มต้น
คือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) และคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เป็นตัวกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิ
50-85 °C ที่ pH3 พบว่าผ้าไหมที่ต่อกิ่งด้วย GM และ AM มีปริมาณการต่อกิ่งสูงสุดเมื่อความเข้มข้น
ของ Cu^{2+} ไอออนมีค่าเท่ากับ 0.22 โมล/ลิตร และ 4×10^{-2} โมล/ลิตร แต่หลังจากนั้นการต่อกิ่งมี
แนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับความเข้มข้นของ APS เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นการต่อกิ่งลดลง
ในขณะที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และ โคมอนอเมอร์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นการ
ต่อกิ่งมีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับสมบัติทางกายภาพที่ปรับปรุงด้วย GM และ AM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ
เปรียบเทียบกับไหมที่ไม่ได้ต่อกิ่ง ส่วนสัณฐานวิทยาของไหมที่ต่อกิ่งของผสม GM และ AM
พบว่ามีสายโซ่ข้างเคียงขนาดใหญ่เกิดขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. เส้นใยไหมคิบพันธุ์ (*Bombyx mori*) จากจังหวัดขอนแก่น
2. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) จากบริษัท CARLO ERBA (เกรดปฏิบัติการ)
3. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3) จากบริษัท CARLO ERBA (เกรดปฏิบัติการ)
4. สบู่ ยี่ห้อ ลักซ์
5. มอนอเมอร์ชนิด 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) จากบริษัท MERCK (เกรดวิเคราะห์)
6. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) จากบริษัท CARLO ERBA ความเข้มข้น 98.3 %
7. อะซิโตน (Acetone, CH_3COCH_3)
8. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammoniumpersulfate, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) จากบริษัท CARLO ERBA (เกรดปฏิบัติการ)
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จากบริษัท CARLO ERBA (เกรดปฏิบัติการ)
10. น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. บีกเกอร์
2. ขวดวัดปริมาตร
3. แท่งแก้วคน
4. ปิเปต
5. ปากคีบ
6. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
8. เตาอบ
9. กระดาษวัด pH
10. ห้องควบคุมอุณหภูมิ

11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455 VP
12. เครื่องทดสอบสมบัติทางแรงดึง (Universel Testing Machine, UTM) รุ่น LR 5K
13. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) รุ่น Spectrum GX Perkin Elmer

3.3 ขั้นตอนในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนงานวิจัยเป็น 3 ขั้นตอน คือ การลอกกาวยเส้นใยไหม การดักกิ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA และขั้นตอนการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหม ได้แก่ การทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหม

3.3.1 การลอกกาวยเส้นใยไหมด้วยสบู่-โซดา

1. การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการลอกกาว ในอัตราส่วนวัสดุต่อสารละลายผสมเป็น 1:30
 - สารละลาย Na_2CO_3 0.05 โมล/ลิตร
 - สารละลาย NaHCO_3 0.05 โมล/ลิตร
 - สบู่ 8 กรัม/ลิตร
2. ชั่งเส้นใยไหมดิบด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และบันทึกน้ำหนัก
3. แช่เส้นใยไหมดิบในสารละลายลอกกาวผสมของสารละลาย Na_2CO_3 และ NaHCO_3 (ในอัตราส่วนสารละลายผสม 1:1)
4. นำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
5. นำเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวไหมมาล้างด้วยน้ำร้อน และน้ำ ที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง ซับให้แห้ง และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งหาน้ำหนักของเส้นใยไหมที่หายไปหลังจากการลอกกาว
6. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยไหมที่หายไปหลังการลอกกาว (%Weight loss) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ [1]

$$\% \text{ Weight loss} = ((w_2 - w_1) / w_1) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ w_1 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังการลอกกาว

w_2 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมก่อนการลอกกาว

3.3.2 การต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA

1. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการต่อกิ่งโดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุกับสารละลายเป็น

1:20

- สารละลาย HEMA 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร
- สารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 0.05 โมล/ลิตร
- H_2SO_4 0.05 โมล/ลิตร
- CH_3COCH_3

2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของเส้นใยไหมลอกกาวด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และบันทึกน้ำหนัก

3. นำสารละลาย HEMA และสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ที่เป็นตัวเริ่มต้น และปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 3 โดยใช้ H_2SO_4

4. นำเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวแช่ในสารละลายที่ใช้ในการต่อกิ่ง

5. ปิดบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟอยล์ให้สนิทเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการต่อกิ่ง

6. นำของผสมที่เตรียมได้ไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80 °C ทำเป็นเวลานาน 30 นาที

7. นำเส้นใยไหม ที่ผ่านการต่อกิ่งไปล้างด้วย CH_3COCH_3 2-3 ครั้ง และล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปชั่งหาน้ำหนักของเส้นใยไหมหลังจากการต่อกิ่ง

8. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ของเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้น หลังการต่อกิ่ง (% Weight gain) [1]

$$\% \text{ Weight gain} = ((w_2 - w_1) / w_1) \quad (3.2)$$

เมื่อ

w_1 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมก่อนการต่อกิ่ง

w_2 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังการต่อกิ่ง

3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติต่างๆ

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพในการดูดซับความชื้น (Moisture regains)

1. นำตัวอย่างเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA มาวางทิ้งไว้ในห้องควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิ 20 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 % เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง น้ำหนักที่หาได้ในส่วนนี้ คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมที่ดูดซับความชื้น

2. หลังจากนั้นนำเส้นใยไหมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100-105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งจึงนำค่าที่ได้ทั้งสองค่ามาคำนวณหาความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ผลต่างที่ได้ จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการดูดซับความชื้นของเส้นใยไหม

$$\% \text{ Moisture regains} = ((w_2 - w_1) / w_1) \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังจากการอบ

W_2 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังจากทิ้งไว้ในห้องควบคุมความชื้น

2. สัณฐานวิทยาของเส้นใยไหม

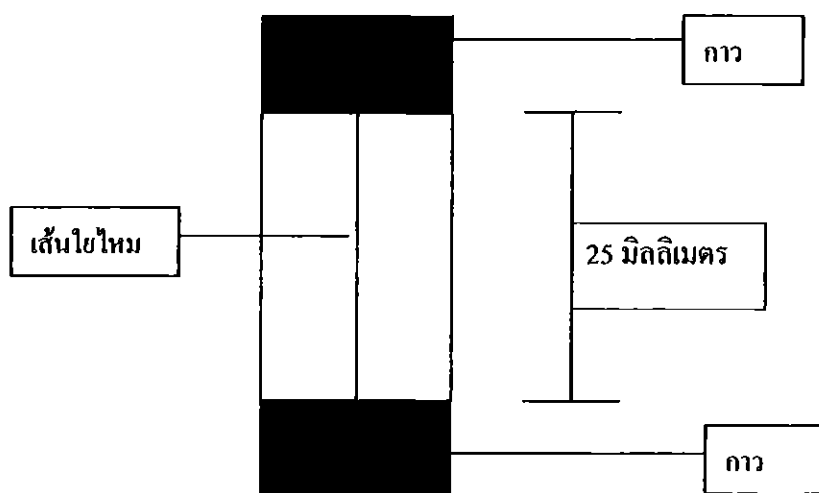
การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหม เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA โดยใช้เทคนิค SEM และก่อนนำเส้นใยไหมไปทำการวิเคราะห์ จะต้องนำเส้นใยไหมไปทำการเคลือบด้วยทองเพื่อป้องกันการเกิดประจุสะสมบนผิวเส้นใยไหม

3. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยไหมจากการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันระดับโมเลกุลของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA โดยใช้เทคนิค FTIR โดยตัดเส้นใยไหมออกเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 2 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ 200 มิลลิกรัม ทำให้เป็นแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ ทำการวิเคราะห์เส้นใยไหมในช่วงคลื่น 400-4000 cm^{-1} สแกน 4 รอบต่อ 1 ตัวอย่าง

4. การทดสอบสมบัติทางแรงดึง

ศึกษาหาค่าแรงที่ใช้ในการดึง (Load) เปอร์เซ็นต์การดึงบีด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมที่ผ่านกระบวนการดัดแปรโดยการต่อกึ่งด้วย HEMA ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางแรงดึง UTM โดยใช้ (Load cell) ขนาด 500 นิวตัน และใช้ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตร/นาที ระยะในการจับชิ้นงาน 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป ที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปการเตรียมตัวอย่างการทดสอบแรงดึง



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล ของเส้นใยไหมโดยวิธีการดักด้วย HEMA โดยเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล ระหว่างเส้นใยไหมลอกขาว และเส้นใยไหมดัก ซึ่งมีการแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น การศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมทั้งก่อน และหลังการดักด้วย HEMA

4.1 การลอกขาวเส้นใยไหม

4.1.1 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไปหลังการลอกขาว

เส้นใยไหมดิบก่อนนำไปใช้งาน ต้องนำไปลอกขาวของเส้นใยไหมออก โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง โซเดียมคาร์บอเนต และ โซเดียมไบคาร์บอเนต (อัตราส่วนสารละลายผสม 1:1) ที่อัตราส่วนของวัสดุต่อสารละลายผสมเป็น 1:30 ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเส้นใยไหมที่ได้ทำการลอกขาวจะมีเปอร์เซนต์น้ำหนักของเส้นใยไหมที่ลดลง (%Weight loss) คิดเป็น เปอร์เซนต์ได้เท่ากับ 26.40 % ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) เนื่องจากเส้นใยไหมดิบมีกาวยไหมเคลือบอยู่ ที่พื้นผิวด้านนอกของเส้นใยไหม เมื่อทำการลอกขาวแล้วจึงทำให้กาวยไหมที่เคลือบอยู่หลุดออก จึงทำให้น้ำหนักของเส้นใยไหมดิบลดลง

4.1.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกขาว

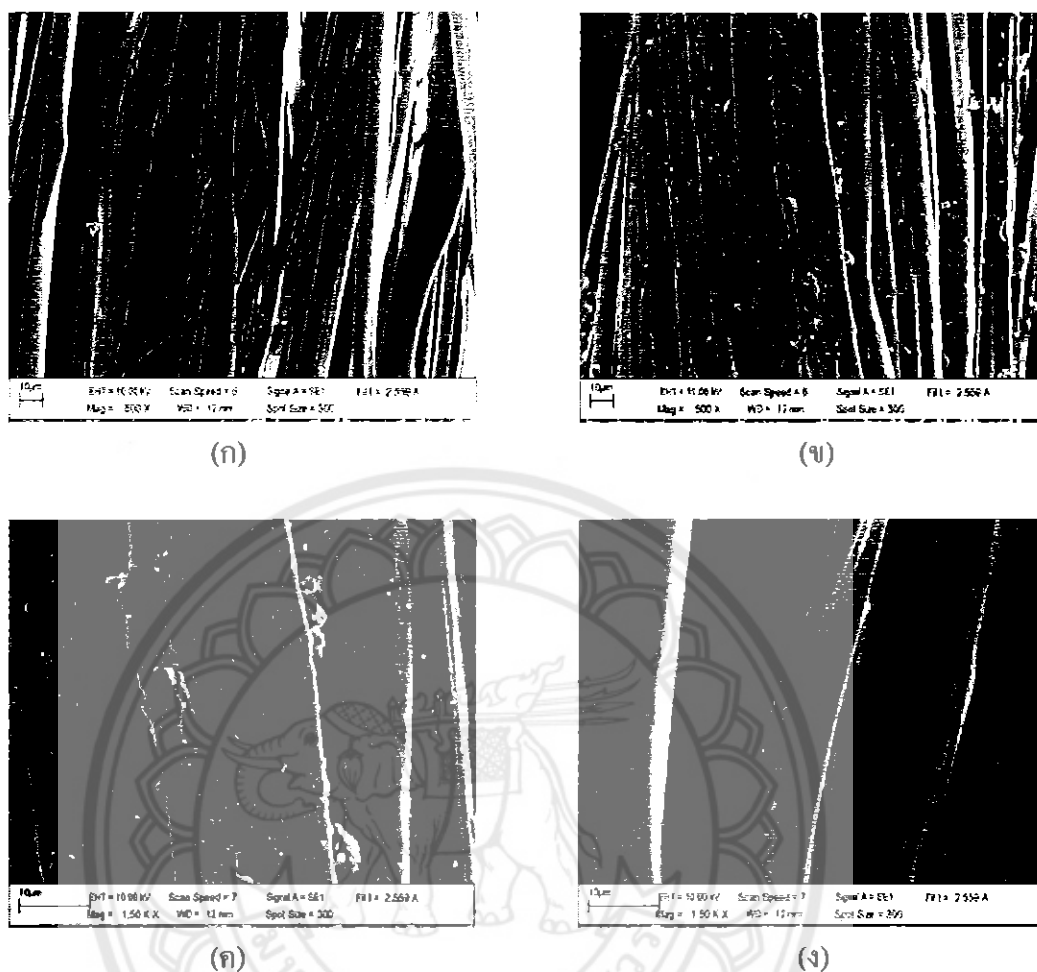
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes, SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า ซึ่งแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกขาว ซึ่งมีลักษณะดังนี้

15060035

มร.

02538

2552



รูปที่ 4.1 ลักษณะผิวของ (ก) เส้นใยไหมดิบที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) เส้นใยไหมลอกกาวที่กำลังขยาย 500 เท่า (ค) เส้นใยไหมดิบที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ง) เส้นใยไหมลอกกาวที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จากการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมดิบ กับเส้นใยไหมลอกกาวโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง Na_2CO_3 และ NaHCO_3 แช่ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเส้นใยไหมดิบมีลักษณะของเส้นใยอยู่เกาะติดกัน และพื้นผิวของเส้นใยไหมมีลักษณะขรุขระ เรียบเป็นช่วงๆ ไม่สม่ำเสมอแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) เนื่องจากกาวไหมที่เคลือบอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกของเส้นใยไหม ส่วนเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวมีพื้นผิวก่อนข้างเรียบ สม่ำเสมอกว่าเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยแต่ละเส้นมีลักษณะแยกออกจากกัน ไม่ยึดติดกันเหมือนเส้นใยไหมดิบเป็นผลมาจากการลอกกาวไหม แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ง)

4.2 ศึกษาการตอ่กึ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการตอ่กึ่งของเส้นใยไหมด้วย HEMA ที่อัตราส่วนวัสดุต่อสารละลายเป็น 1:20 เป็นเวลา 30 นาที ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลาย 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร

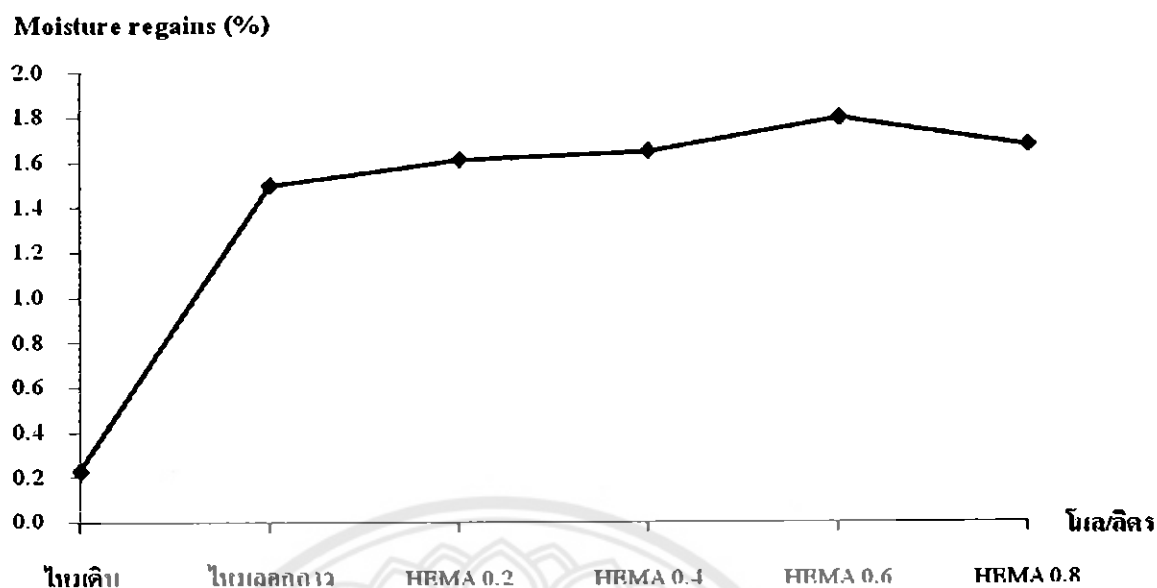
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ผ่านตอ่กึ่งด้วย HEMA

ความสามารถในการตอ่กึ่งของเส้นใยไหมสามารถพิจารณาได้จาก เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ่กึ่ง (%Weight gain) โดยนำเส้นใยไหมลอกกาวไปซังด้วยเครื่องซัง 4 คำแห่ง และนำเส้นใยไหมลอกกาวที่ซังเสร็จแล้วมาทำการตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่อัตราส่วนวัสดุต่อสารละลายเป็น 1:20 เป็นเวลา 30 นาที ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลาย 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร จากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาซังน้ำหนักโดยใช้เครื่องซัง 4 คำแห่ง พบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น (%Moisture regains) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่สภาวะมาตรฐาน คืออุณหภูมิ 20 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ่กึ่ง (%Weight gain) แลเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการดูดซับความชื้น (% Moisture regains) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมตอ่กึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดของตัวอย่าง	%Weight gain	%Moisture regains
ไหมดิบ	-	0.2311
ไหมลอกกาว	-	1.4980
HEMA 0.2 โมล/ลิตร	23.82	1.6121
HEMA 0.4 โมล/ลิตร	31.61	1.6486
HEMA 0.6 โมล/ลิตร	44.20	1.7968
HEMA 0.8 โมล/ลิตร	35.60	1.6734



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความสัมพัทธ์ระหว่างการดูดซับความชื้น (%Moisture regains) ของเส้นใย ไบโอดีบ เส้นใยไบโอดีบกลาว และเส้นใยไบโอดีบที่ดัดแปลงด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเส้นใยไบโอดีบก่อนการดัดแปลง และเส้นใยไบโอดีบหลังการดัดแปลงพบว่าเส้นใยไบโอดีบหลังการดัดแปลง มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยไบโอดีบเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยไบโอดีบที่ดัดแปลงด้วย HEMA จะมีอนุภาคของ HEMA มาเกาะอยู่บริเวณผิวของเส้นใยไบโอดีบ และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยไบโอดีบที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการดัดแปลงเมื่อความเข้มข้นของ HEMA เพิ่มขึ้น พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไบโอดีบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ของแต่ละระดับความเข้มข้นจะพบว่า ในระดับความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่สามารถทำการดัดแปลงเส้นใยไบโอดีบได้ดีที่สุด เนื่องจาก ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตรเป็นระดับความเข้มข้นน้อยที่สุด จะทำให้มีอนุภาคของ HEMA มาเกาะบนพื้นผิวของเส้นใยไบโอดีบน้อย จึงทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด [1] มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียง 23.82 เปอร์เซ็นต์ และในระดับความเข้มข้นที่ 0.4 โมล/ลิตร มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้น 31.61 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 44.20 เปอร์เซ็นต์ ระดับความเข้มข้น 0.8 โมล/ลิตร มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้น 35.60 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่สามารถทำการดัดแปลงเส้นใยไบโอดีบได้ดีที่สุด สาเหตุที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร มี

ความสามารถในการดักจับของเส้นใยไหมสูงที่สุดเพราะ ที่ระดับความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่ HEMA เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบดักจับ ได้อย่างสมบูรณ์ที่สุดในช่วงความเข้มข้นนี้ [19] และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นเป็น 0.8 โมล/ลิตร ทำให้ปริมาณ HEMA มีมากเกินไปและจะทำปฏิกิริยากันเองและตกตะกอน จึงทำให้ HEMA ที่ไปเกาะกับเส้นใยไหมน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร

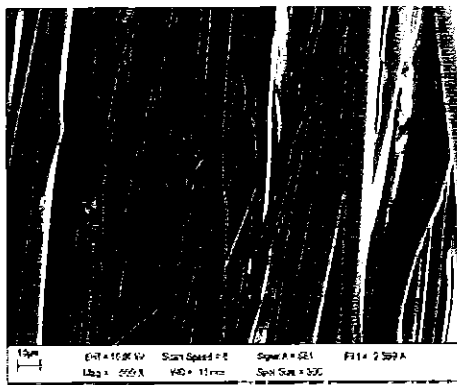
จากตารางที่ 4.1 พิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้น โดยดูจาก %Moisture regains ระหว่างเส้นใยไหมดิบกับเส้นใยไหมลอกขาว พบว่าเส้นใยไหมดิบมีความสามารถในการดูดซับความชื้นน้อยกว่าไหมลอกขาว ซึ่งผลที่ได้เป็นผลมาจากองค์ประกอบของขาวไหมที่เคลือบอยู่ที่ผิวด้านนอก ที่มีกรดอะมิโนเป็นส่วนประกอบหลัก และยังมีสารอื่นๆ เคลือบอยู่ด้านนอกด้วยเช่น ซีลีค คาร์โบไฮเดรต วัตถุที่มีสี และสารอนินทรีย์ เป็นต้น ทำให้เส้นใยไหมมีลักษณะที่เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากขึ้น เพราะเหตุนี้เส้นใยไหมดิบจึงมีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกขาว

และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้น ระหว่างเส้นใยไหมก่อนการดักจับ และเส้นใยไหมหลังการดักจับพบว่าเส้นใยไหมหลังการดักจับจะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงกว่าเส้นใยไหมก่อนการดักจับ เป็นผลมาจากเส้นใยไหมที่ดักจับด้วย HEMA มีพวกลิพิดของ HEMA ซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล มาเกาะอยู่บนผิวด้านนอกของเส้นใยไหมมากขึ้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เส้นใยไหมที่ดักจับด้วย HEMA มีความสามารถในการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น

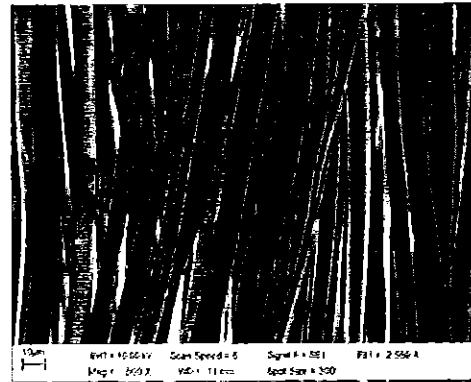
ส่วนในกรณีของเส้นใยไหมที่ดักจับด้วย HEMA ในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้น ในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด เนื่องจากไฮดรอกซิลของ HEMA ซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงทำให้ที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร มีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงที่สุด ส่วนที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.8 โมล/ลิตร จะมีความสามารถในการดักจับได้น้อยกว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นน้อยกว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร [1, 19]

4.2.2 ลักษณะวิทยาของเส้นใยไหมที่ผ่านดักจับด้วย HEMA

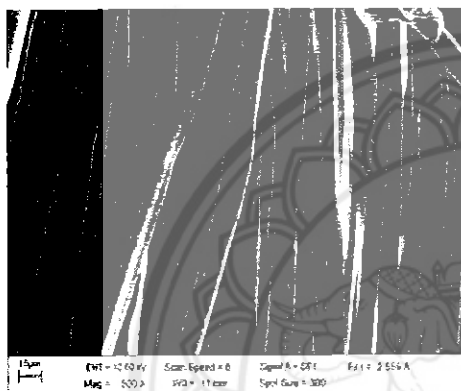
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะวิทยาของเส้นใยไหม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes, SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า ซึ่งแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกขาว และเส้นใยไหมที่ผ่านการดักจับที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า



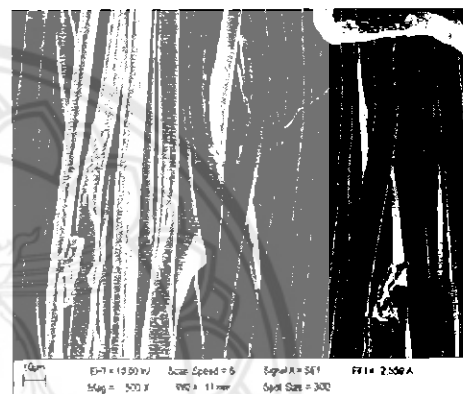
(ก)



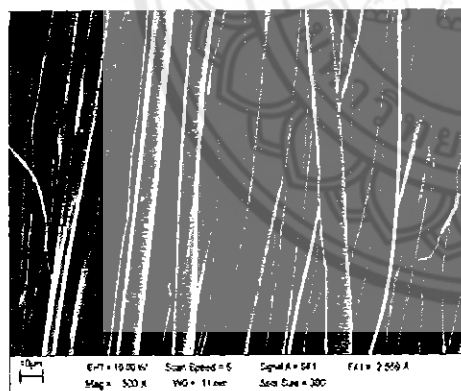
(ข)



(ค)



(ง)

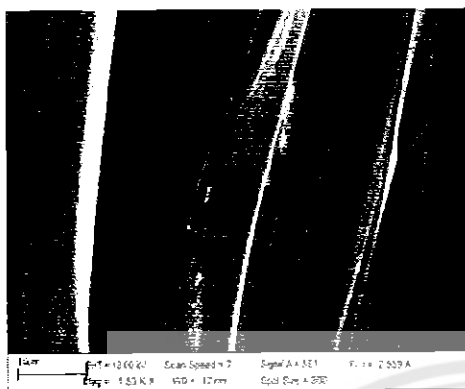


(จ)

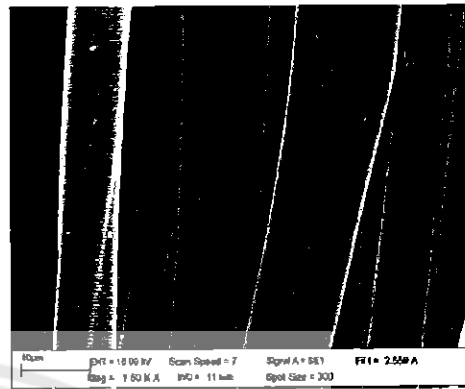
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก) เส้นใยไหมลอกขาว (ข) HEMA 0.2 โมล/ลิตร (ค) HEMA 0.4 โมล/ลิตร (ง) HEMA 0.6 โมล/ลิตร (จ) HEMA 0.8 โมล/ลิตร

จากการศึกษาเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมก่อนการดักกิ่ง และเส้นใยไหมที่ดักกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในรูป 4.3 (ก), (ข), (ค), (ง) และ (จ) พบว่า

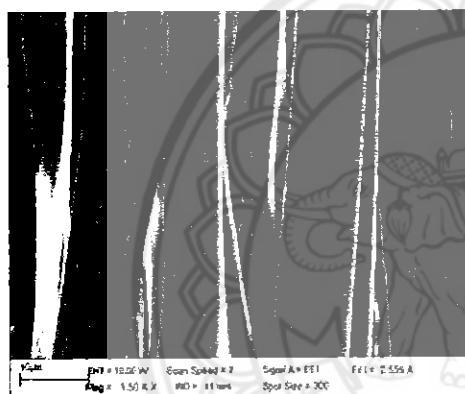
เส้นใยไหมจะอยู่กันแบบเป็นเส้นเคี้ยว แยกออกจากกัน และเริ่มเห็นได้ว่ามีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบ และมี มอนอเมอร์ HEMA เข้ามาเกาะบริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหม



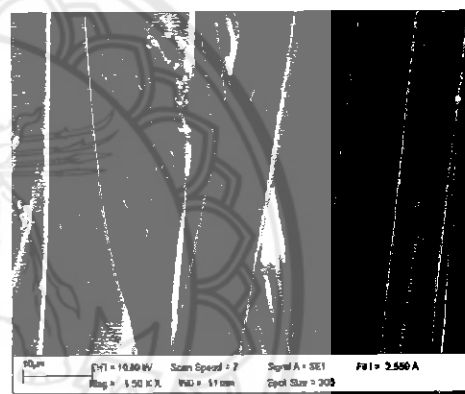
(ก)



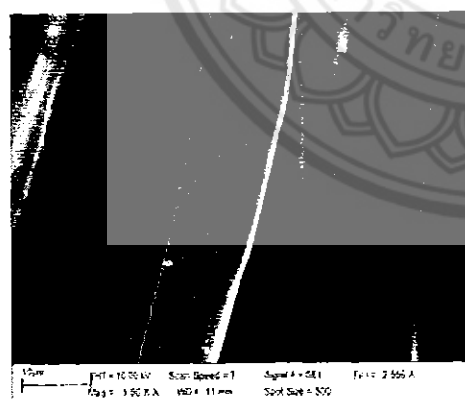
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.4 ตัณฐานวิทยาที่กล้องจุลทรรศน์ 1500 เท่า (ก) เส้นใยไหมลอกขาว (ข) HEMA 0.2 โมล/ลิตร (ค) HEMA 0.4 โมล/ลิตร (ง) HEMA 0.6 โมล/ลิตร (จ) HEMA 0.8 โมล/ลิตร

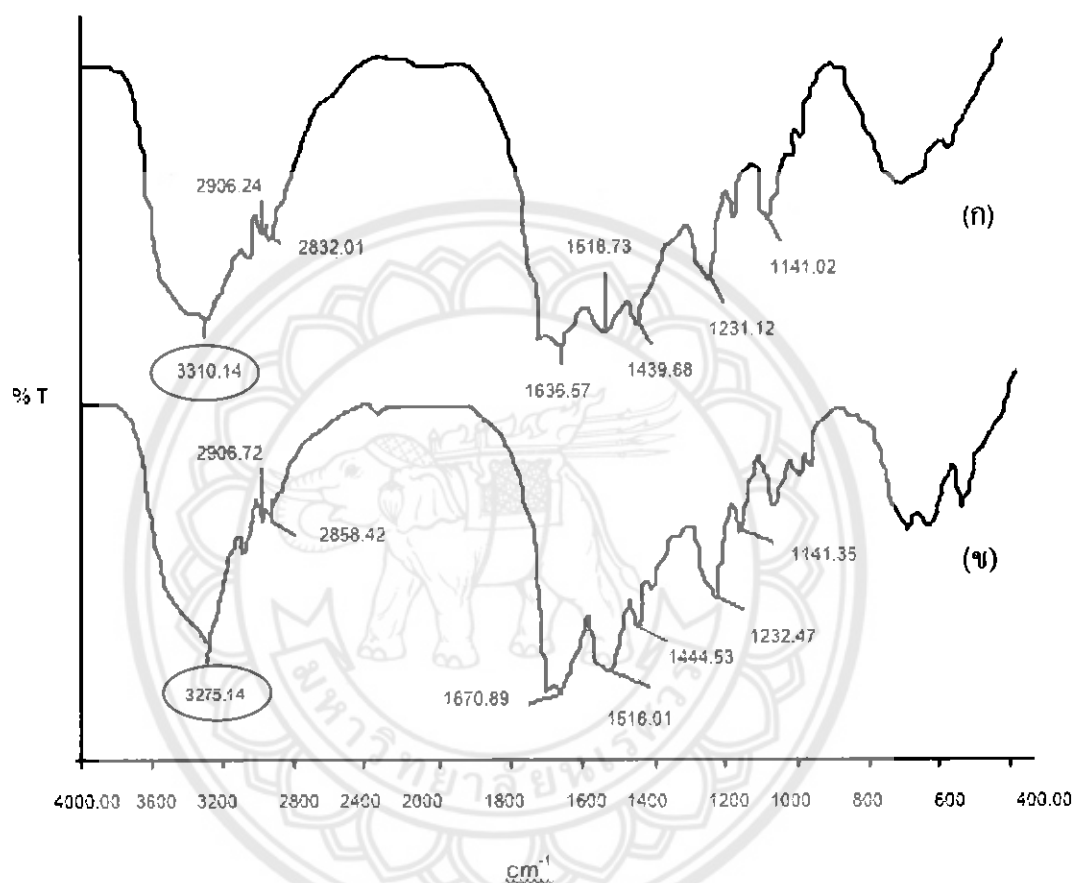
จากการศึกษาเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมก่อนการต่อกิ่ง และเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA พบว่า ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมก่อนการต่อกิ่ง มีลักษณะพื้นผิวมีความเรียบและสะอาดมากกว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ดังแสดงในรูป 4.4 (ก)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA จะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ และที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ และสะอาดกว่าเมื่อเทียบกับลักษณะเส้นใยไหมในระดับความเข้มข้นต่างๆ และมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นใยไหมลอกขาว ดังแสดงในรูป 4.4 (ข) ที่ความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร จะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระมากกว่าที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ดังแสดงในรูป 4.4 (ค) และที่ระดับความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร จะมีความขรุขระมากที่สุดเมื่อเทียบกับลักษณะเส้นใยไหมในระดับความเข้มข้นแต่ละระดับ ดังแสดงในรูป 4.4 (ง) ส่วนที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.8 โมล/ลิตร จะมีลักษณะพื้นผิวเรียบกว่าลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร ดังแสดงในรูป 4.4 (จ) เนื่องจากการต่อกิ่งเส้นใยไหมก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยไหมกับ HEMA บนพื้นผิวของเส้นใยไหม ด้วยพันธะทางเคมี หรือยึดเกาะกันทางกายภาพ เกิดเป็นแผ่นพอลิเมอร์ของ HEMA เกาะอยู่บนเส้นใยไหม ที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่สารละลาย HEMA เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งได้สมบูรณ์ที่สุด [19] และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ HEMA จึงทำให้ HEMA ทำปฏิกิริยากันเองแล้วตกตะกอน จึงทำให้ HEMA ที่ไปเกาะกับเส้นใยไหมน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร จากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง ส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยไหมเกิดเป็นแผ่นพอลิเมอร์ HEMA เกาะอยู่ที่ผิวของเส้นใยไหมเพิ่มมากขึ้น [19]

4.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันโดยวิธีการทางเคมี

ในการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นใยไหมทั้งก่อน และหลังการลอกกาบ โดยใช้เทคนิค ฟูเรียสทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ได้ผลดังนี้

การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาบ



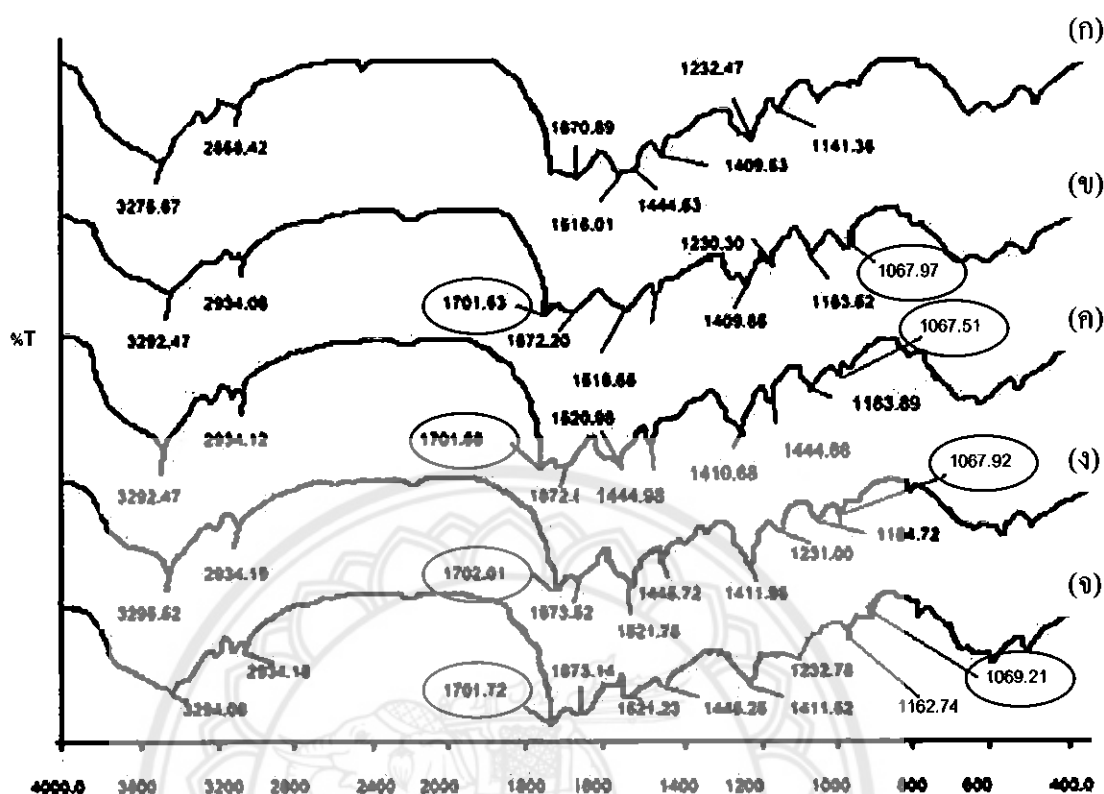
รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมดิบ (ข) เส้นใยไหมลอกกาบ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัม ระหว่างเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกกาบ (รูปที่ 4.5) พบว่า อินฟราเรดสเปกตรัม ของเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกกาบ มีแถบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน ยกเว้นในตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญ คือ 3310 และ 3275 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ N-H stretching ของเส้นใยไหมทั้งสองชนิดโดยลักษณะพีคของเส้นใยไหมดิบในช่วงเลขคลื่นนี้จะแคบกว่าเส้นใยไหมลอกกาบ และอยู่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นสูงกว่าไหมลอกกาบ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นเกิดจากกาบไหมที่เคลือบอยู่บนเส้นใยไหมดิบจะหลุดออกไปในขั้นตอนของการลอกกาบ

ตำแหน่งอินฟราเรดสเปกตรัมที่สำคัญของเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกกาวที่ตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน และที่แตกต่างกันระหว่างเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกกาว สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปตำแหน่งแถบการดูดกลืนของเส้นใยไหมดิบและเส้นใยไหมลอกกาว ที่แสดงในรูปที่ 4.5 [1]

ชนิดของพอลิเมอร์	เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืน
ไฟโบรอิน	3500-3200	N-H stretching
ไฟโบรอิน	2990-2850	C-H stretch in $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$
ไฟโบรอิน	1680-1630	C=O stretching and N-H bending in amide (amide I band)
ไฟโบรอิน	1518	C=O stretching and N-H bending in amide (amide II band)



รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยไหมลอกกาบ (ข) HEMA 0.2 โมล/ลิตร (ค) HEMA 0.4 โมล/ลิตร (ง) HEMA 0.6 โมล/ลิตร (จ) HEMA 0.8 โมล/ลิตร

จากรูปที่ 4.6 แสดง อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาว กับเส้นใยไหมที่ต่อกิ้งด้วย HEMA แต่ละความเข้มข้น มีลักษณะแถบการดูดกลืนคล้ายกันกลับเส้นใยไหมลอกกาว แต่เส้นใยไหมที่ต่อกิ้งด้วย HEMA พบว่า จะมีแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ช่วงคลื่น $1702-1701\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C=O stretching ซึ่งตำแหน่งเลขคลื่นช่วงนี้ เป็นตำแหน่งของ HEMA ที่เข้ามาเกาะกับเส้นใยไหม และที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1069-1067\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C-O stretching ของ HEMA

ตารางที่ 4.3 สรุปตำแหน่งแถบการดูดกลืนของเส้นใยไหมลอกกวและไหมที่ทำการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่แสดงในรูปที่ 4.6 [1]

ชนิดของพอลิเมอร์	เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืน
ไฟโบอีน	3500-3200	N-H stretching
ไฟโบอีน	2990-2850	C-H stretch in $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$
ไฟโบอีน	1680-1630	C=O stretching and N-H bending in amide (amide I band)
ไฟโบอีน	1518	C=O stretching and N-H bending in amide (amide II band)
HEMA	1724-1732	C=O stretching in ester
HEMA	1300-1000	C-O stretching in ester

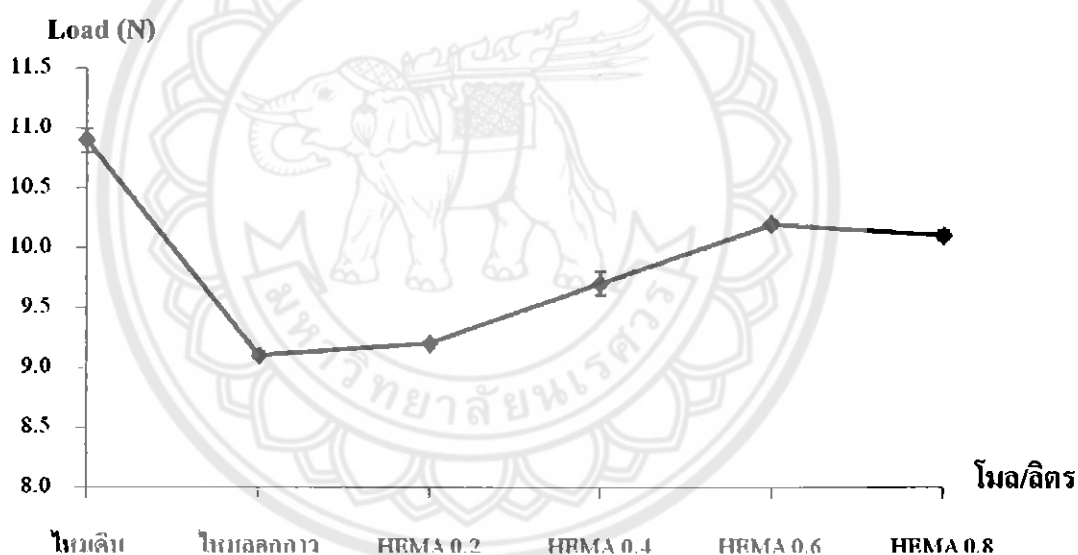
4.2.4 การทดสอบสมบัติทางแรงดึง

ในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของ HEMA ที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเส้นใยไหมด้วยวิธีการต่อกิ่ง ที่มีต่อสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยไหมทั้งก่อนและหลังการลอกกว กับเส้นใยไหมก่อน และหลังการต่อกิ่งโดยสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยไหมที่ถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แรงที่ใช้ในการดึง (Load) เปอร์เซ็นต์การดึงยืดยาว จุดขาด (% Elongation at Break) โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ให้ผลการทดลองดังนี้

1. แรงที่ใช้ในการดึง (Load)

ตารางที่ 4.4 แรงที่ใช้ในการดึง (Load) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดของตัวอย่าง	Load (N)	SD
ไหมดิบ	10.9	0.1
ไหมลอกกาว	9.1	0.03
HEMA 0.2 โมล/ลิตร	9.2	0.02
HEMA 0.4 โมล/ลิตร	9.7	0.1
HEMA 0.6 โมล/ลิตร	10.2	0.03
HEMA 0.8 โมล/ลิตร	10.1	0.04



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึง (Load) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงของเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอกกาว พบว่าเส้นใยไหมดิบมีค่าแรงที่ใช้ในการดึงสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากกาวไหมที่เคลือบอยู่บนเส้นใยไหม เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของเส้นใยไฟโบรอิน ส่งผลให้เส้นใยมีความสามารถในการต้านแรงที่ใช้ในการดึง ได้สูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

เมื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงระหว่างเส้นใยไหมที่ค่อถึงด้วย HEMA และเส้นใยไหมก่อนการค่อถึง พบว่า ค่าแรงที่ใช้ในการดึงของเส้นใยไหมหลังการค่อถึง มีค่าแรงที่ใช้ในการดึงสูงกว่าค่าแรงที่ใช้ในการดึงของเส้นใยไหมก่อนการค่อถึง ลักษณะดังกล่าว เป็นผลมาจากมอนอเมอร์ที่ใช้ในการค่อถึง เกิดการรวมตัวกันเป็น โอลิโกเมอร์เกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยไหม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เส้นใยไหมที่ค่อถึงด้วย HEMA มีความสามารถในการต้านแรงที่ใช้ในการดึงได้สูงกว่าเส้นใยไหมก่อนการค่อถึง โดยที่ระดับความเข้มข้นของ HEMA ที่ 0.2 โมล/ลิตร มีค่าต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกับ เส้นใยไหมลอกขาว เพราะที่ระดับความเข้มข้นของ HEMA ที่ 0.2 โมล/ลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่น้อยมาก หรือมีความเจือจางมากที่สุดจึงทำให้มอนอเมอร์ของ HEMA เกาะกับเส้นใยไหมได้น้อย

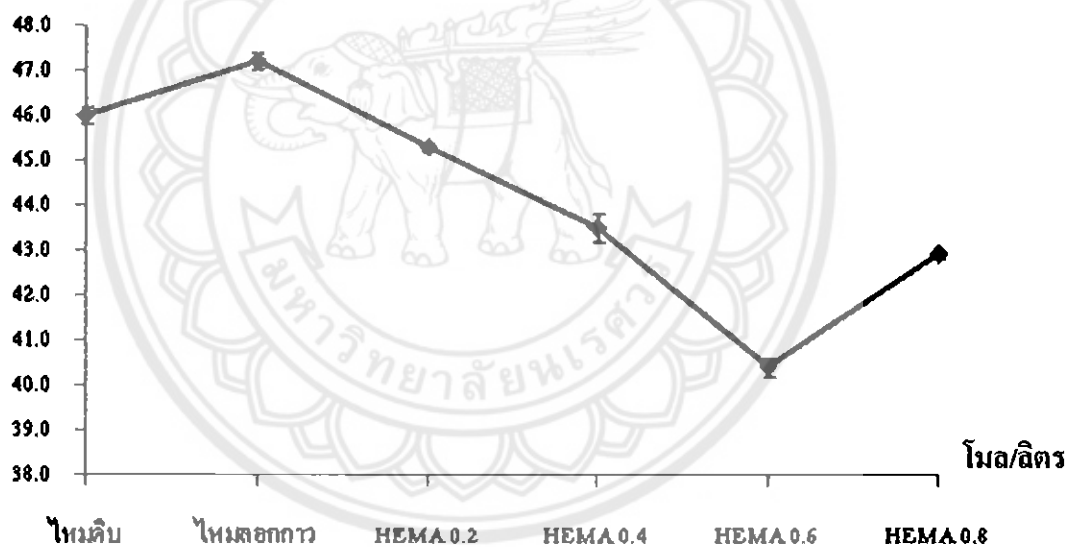
เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงที่ใช้ในการดึงของเส้นใยไหมที่ค่อถึงด้วย HEMA ในแต่ละระดับความเข้มข้นพบว่า มีค่าแรงที่ใช้ในการดึงใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นของ HEMA และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของ HEMA ที่ทำการค่อถึง โดยที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีค่าแรงที่ใช้ในการดึงสูงที่สุด ถึง และที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.8 โมล/ลิตร จะมีค่าแรงที่ใช้ในการดึงต่ำลง เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร สารละลาย HEMA จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบค่อถึงสมบูรณ์ที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.8 โมล/ลิตร ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากเกินไปจนทำให้ HEMA ทำปฏิกิริยากันเอง และตกตะกอน จึงทำให้ HEMA ที่ไปเกาะกับเส้นใยไหมน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร จึงทำให้มีการต้านทานแรงที่ใช้ในการดึงที่ต่ำลง แรงที่ใช้ในการดึงจึงต่ำลงไปด้วย [1, 19]

2. เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break)

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมค่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดของตัวอย่าง	%Elongation at Break	SD
ไหมดิบ	45.8	0.2
ไหมลอกกาว	47.2	0.2
HEMA 0.2 โมล/ลิตร	45.3	0.1
HEMA 0.4 โมล/ลิตร	43.5	0.3
HEMA 0.6 โมล/ลิตร	40.4	0.2
HEMA 0.8 โมล/ลิตร	42.9	0.1

Elongation at Break (%)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมค่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าเส้นใยไหมดิบ เนื่องจากกาวไหมที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเส้นใยไหม เป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงของเส้นใยไหม ทำให้แรงที่ส่งผ่านเส้นใยไหมลดลง ส่งผลทำให้ความสามารถในการยึดค้ำ และเมื่อ

กำจัดกาวไหมออกไปทำให้เส้นใยไหมมีความสามารถในการกระจายแรงมากขึ้น ดังนั้นเส้นใยไหมที่ลอกกาวจึงมีความสามารถในการดึงยืดสูงกว่าเส้นใยไหมดิบ

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA เปรียบเทียบกับเส้นใยไหมก่อนการต่อกึ่งพบว่า เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีความสามารถในการยืดต่ำกว่าเส้นใยไหมก่อนการต่อกึ่ง เพราะ HEMA ที่เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหม เป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงไปยังเส้นใยไหม ส่งผลให้เส้นใยไหมหลังการต่อกึ่งมีการยืดตัวที่ต่ำลง

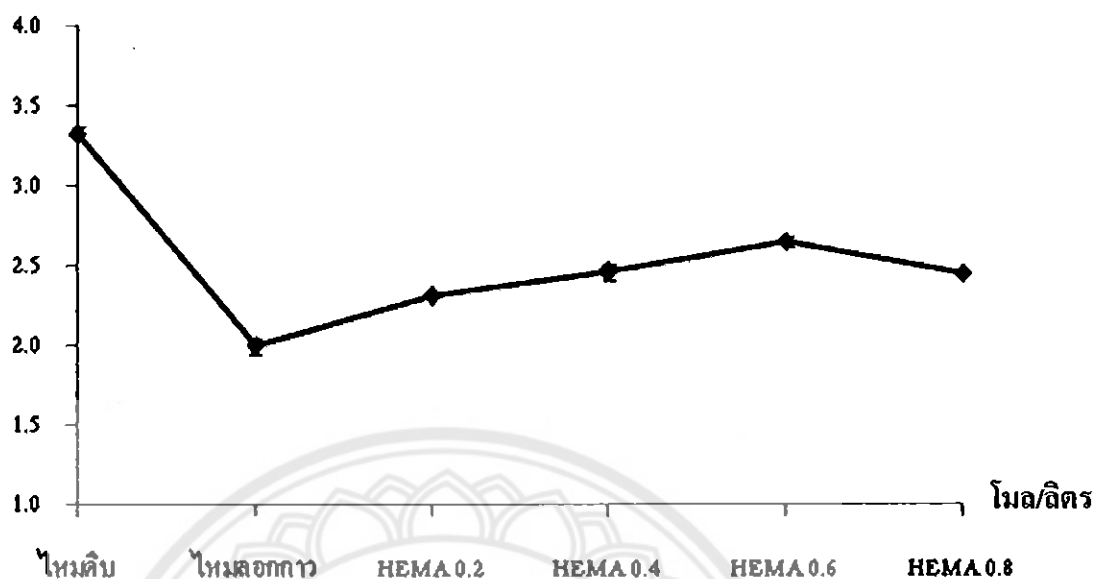
และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดจะต่ำลงตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด เนื่องจาก HEMA ที่ใช้ในการต่อกึ่งเส้นใยไหมเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่งในบริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหมจะมี HEMA เกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยไหม ซึ่งโอลิโกเมอร์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงของเส้นใยไหม ทำให้เส้นใยไหมมีความสามารถในการกระจายแรงของเส้นใยไหมลดลง ส่งผลให้เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งที่มีความสามารถในการดึงยืดลดลง ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 0.8 โมล/ลิตร จะมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร สารละลาย HEMA จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง สมบูรณ์ที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.8 โมล/ลิตร ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากเกินไปจนทำให้ HEMA ทำปฏิกิริยากันเองและตกตะกอน จึงทำให้ HEMA ที่ไปเกาะกับเส้นใยไหมน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร ทำให้แรงสามารถส่งผ่านไปยังเส้นใยไหมได้มากขึ้นจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น [1, 19]

3. มอดุลัสของยัง (Young's Modulus)

ตารางที่ 4.6 มอดุลัสของยัง (Young's Modulus) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาว และเส้นใยไหมต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดของตัวอย่าง	Young's Modulus (MPa)	SD
ไหมดิบ	3.33	0.04
ไหมลอกกาว	2.00	0.05
HEMA 0.2 โมล/ลิตร	2.31	0.02
HEMA 0.4 โมล/ลิตร	2.46	0.05
HEMA 0.6 โมล/ลิตร	2.65	0.03
HEMA 0.8 โมล/ลิตร	2.45	0.02

Young's Modulus (MPa)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) ของเส้นใยไหมดิบ เส้นใยไหมลอกกาบ และเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเส้นใยไหมดิบมีค่ามอดุลัสของยัง สูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาบ เพราะกาบไหมเคลือบอยู่ที่ผิวของเส้นใยไหม ทำให้เส้นใยไหมมีความแข็งแรงกระด้างทำให้มีความสามารถในการต้านแรงสูง แต่ความสามารถในการยืดตัว จึงมีค่ามอดุลัสของยังสูงด้วย เนื่องจากมอดุลัสของยัง เป็นอัตราส่วนของความแข็งแรงของแรงดึงต่อความเครียด

เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยัง ของเส้นใยไหมก่อนการต่อกิ่ง และเส้นใยไหมหลังการต่อกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมหลังการต่อกิ่งด้วย HEMA มีค่ามอดุลัสของยัง สูงกว่าเส้นใยไหมก่อนการต่อกิ่ง เพราะ HEMA ที่เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหม จะมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูง แต่จะมีความสามารถในการยืดต่ำลง

และเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยัง ของเส้นใยไหม ที่ทำการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นจะมีค่ามอดุลัสของยัง สูงขึ้นตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีค่ามอดุลัสของยัง สูงที่สุด เนื่องจากการต่อกิ่งด้วย HEMA เกิดขึ้นสมบูรณ์ที่สุด ที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้น HEMA ที่ใช้ในการต่อกิ่งเส้นใยไหม จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ในบริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหม เกิดเป็น HEMA เกาะอยู่ที่พื้นผิวของเส้นใยไหม ทำให้มีค่ามอดุลัสของยัง สูงขึ้น ส่วนที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.8 โมล/ลิตร จะมีค่ามอดุลัสของยัง สูงต่ำกว่าที่ระดับความ

เข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร เนื่องจาก ที่ระดับความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร สารละลาย HEMA จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อเนื่องสมบูรณ์ที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.8 โมล/ลิตร ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากเกินไปเลยทำให้ HEMA ทำปฏิกิริยากันเองและตกตะกอน จึงทำให้ HEMA ที่ไปเกาะกับเส้นใยไหมน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงต่ำลงจึงทำให้ค่ามอดุลัสของยัง ต่ำลง [1, 19]



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการนำเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาแล้วมาทำการต่อถึงด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมล/ลิตร โดยผลการทดลองสามารถทำการต่อถึงเส้นใยไหมด้วย HEMA ได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร และได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมทั้งก่อน และหลังทำการต่อถึงสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การลอกกาเส้นใยไหม

เมื่อทำการลอกกาเส้นใยไหมแล้ว ทำให้กาไหมที่เคลือบอยู่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหมหลุดออก ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังการลอกกาลดลง เมื่อเทียบกับเส้นใยไหมดิบ

5.1.2 ศึกษาการต่อถึงเส้นใยไหมดิบด้วย HEMA

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยดูจากความสามารถในการต่อถึง ของ HEMA โดยดูจากค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น พบว่า เส้นใยไหมที่ต่อถึงด้วย HEMA มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เพราะ HEMA จะเข้าไปเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหม จึงทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังการต่อถึงเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยไหมก่อนการต่อถึง และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้น และจะเพิ่มสูงที่สุดที่ความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร และจะลดต่ำลงที่ความเข้มข้น 0.8 โมล/ลิตร

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพในการดูดซับความชื้น พบว่า เส้นใยไหมดิบสามารถดูดซับความชื้นได้น้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกา และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมก่อนการต่อถึง และหลังการต่อถึงด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมหลังการต่อถึงจะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ดีกว่าเส้นใยไหมก่อนการต่อถึง เนื่องจาก HEMA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงทำให้เส้นใยไหมมีความสามารถในการดูดซับความชื้นมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมหลังการต่อถึงในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่าแนวโน้มความสามารถในการดูดซับความชื้นของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้น โดยที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้สูงที่สุด และที่ความเข้มข้น 0.8 โมล/ลิตร ความสามารถในการดูดซับความชื้นจะต่ำลงมา

2. จากการศึกษาด้านฐานวิทยา พบว่า ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมดิบมีลักษณะขรุขระ ส่วนเส้นใยไหมลอกกาจะมีลักษณะเรียบ และสะอาดกว่าเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมที่ต่อถึง

ด้วย HEMA จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่าเส้นใยไหมก่อนการต่อกิ่งเพราะมี HEMA ไปเกาะอยู่ที่บริเวณพื้นผิว ของเส้นใยไหม และมีแนวโน้มที่พื้นผิวของเส้นใยไหมมีความขรุขระมากขึ้น และที่ความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระที่สุด

3. จากการศึกษาหุ้ฟงักชั้น โดยวิธีการทางเคมีของเส้นใยไหมดิบ และเส้นใยไหมลอก กาว มีแถบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน ยกเว้นในตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญ คือ 3310 และ 3275 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ N-H stretching ของเส้นใยไหมทั้งสองชนิด โดยลักษณะพีคของเส้นใยไหมดิบในช่วงเลขคลื่นนี้จะแคบกว่าเส้นใยไหมลอกกาว และอยู่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นสูงกว่าไหมลอกกาว และเมื่อศึกษาอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาว กับเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA แต่ ละความเข้มข้น มีลักษณะแถบการดูดกลืนคล้ายกันกลับเส้นใยไหมลอกกาว แต่เส้นใยไหมที่ต่อกิ่ง ด้วย HEMA พบว่า จะมีแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวในช่วงคลื่น 1702-1701 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C=O stretching ซึ่งตำแหน่งเลขคลื่นช่วงนี้ เป็นตำแหน่งของ HEMA ที่ เข้ามาเกาะกับเส้นใยไหม และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1069-1067 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C-O stretching ของ HEMA

4. การทดสอบสมบัติทางแรงดึง พบว่า เส้นใยไหมดิบจะมีค่าด้านทานแรงดึงได้สูงกว่า เส้นใยไหมลอกกาว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมลอกกาว กับเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่ง ด้วย HEMA จะมีค่าด้านทานแรงดึงได้สูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว และเมื่อเปรียบเทียบเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ค่าด้านทาน แรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้น โดยที่ความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะให้ค่าด้านทาน แรงดึงสูงที่สุด

5. การศึกษาเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด พบว่า เส้นใยไหมดิบมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกกาว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมลอกกาว กับเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าเส้น ใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของเส้นใยไหมที่ต่อ กิ่งด้วย HEMA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของเส้นใยไหมมี แนวโน้มต่ำลง เมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมี เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด

6. การศึกษาค่ามอดุลัสของยัง พบว่า เส้นใยไหมดิบมีค่ามอดุลัสของยังสูงกว่าเส้นใยไหม ลอกกาว และเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยังระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับ เส้นใยไหมที่ต่อกิ่ง ด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA จะมีค่ามอดุลัสของยังสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว และเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยังของเส้นใยไหมลอกกาวในแต่ละความเข้มข้นพบว่า ค่ามอดุลัส ของยังจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้น โดยที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.6 โมล/ลิตร จะมีค่า มอดุลัสของยังสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาพัฒนา ในการศึกษาถึงความสบายในการสวมใส่ การทนแดด ทนเหงื่อ เพื่อให้ได้ผ้าไหมที่มีคุณภาพต่อไปในอนาคต

5.2.2 ควรศึกษาในการนำสารสกัดจากกาวไหมไปใช้ในด้านอื่นๆ เช่น ทางการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรมอาหาร ฯลฯ



เอกสารอ้างอิง

- [1] กุลชล บุญสวัสดิ์. 2549. “สมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายของไหมที่ดอกลงด้วยเมทา-
คริลเลตและ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริลเลต”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
- [2] MTEC,NSTDA. 2004.คอนแทกเลนส์ทำจากวัสดุชนิดใด. สืบค้นเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม 2551.
จาก www.mtec.or.th/thnews/q_a/qa23.html
- [3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2005.
2-Hydroxy ethylmethacrylate. สืบค้นเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม 2551.
จาก www.msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=296
- [4] อภิชาติ สนธิสมบัติ. 2543 กระบวนการเคมีสิ่งทอ.พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ:คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- [5] มณฑา จันท์เกตุเล็ก. 2541 วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น.พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สมาคม
เศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- [6] ชนิดา พงศ์ลิมานนท์. 2542 เคมีอินทรีย์เบื้องต้น.พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [7] ไสภณ รังสำราญ, อมร เพชรสม, ศุภสร พัฒนอักษร และสุรัช พกภคกุล. 2545 อิทธิยเคมี II.
พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [8] ลลิตา บุญโถม.2546 “สมบัติทางกายภาพและการย่อยสลายของเส้นใยไหมที่ทำการดอกลงกับไว
นินิล มอนอเมอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์บัณฑิต
วิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] H. Zhang, J. Magoshi, M. Becker, J.Y. Chen and R. Matsunaga. 2002. “Thermal Properties
of Bombyx Mori Silk Fibers” *Journal of Applied Polymer Science*, vol.86.pp.1817-1820.
- [10] โครงสร้างของโปรตีนไฟโบรอิน. วันที่สืบค้น 3 มิถุนายน 2552. จาก
www.pkc.ac.th/chemical_bonding/answer5.htm
- [11] ศูนย์ข้อมูลและวัตถุดิบทราย และเคมีภัณฑ์ (2-Hydroxyethyl methacrylate) วันที่สืบค้น
3 มิถุนายน 2552 จาก <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=297>
- [12] วัฒนา คล้ายรัสมิ. 2547. “การปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมโดยวิธีการดอกลงกับไว
นินิล มอนอเมอร์ในเอทานอลและน้ำ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิ
เมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

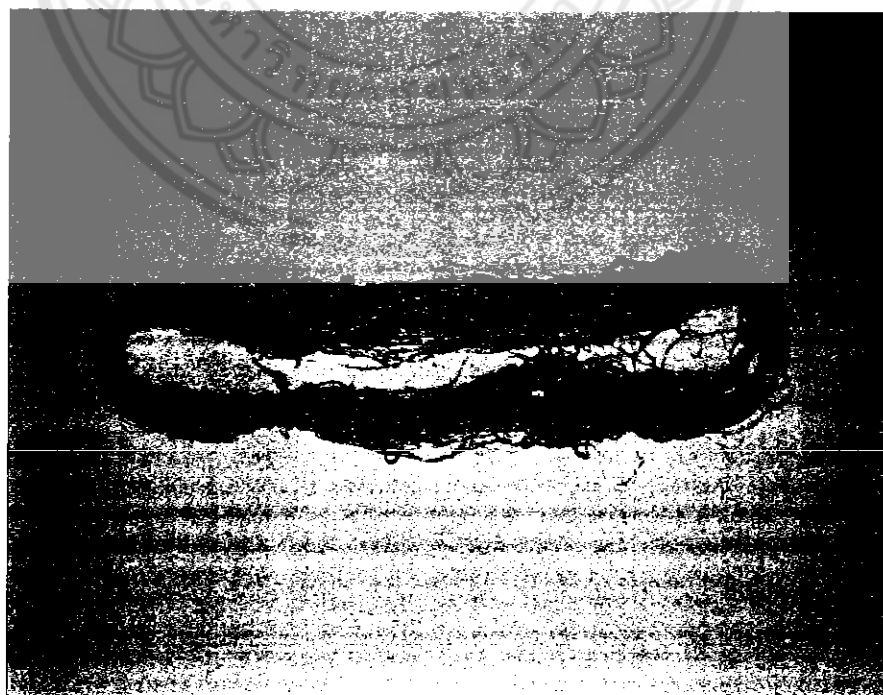
- [13] T. Arai, H. Ishikawa, G. Freddi, S. Winkler and M. Tsukada. 2001. "Chemical Modification of Bombyx Mori Silk Using Isocyanate" *Journal of Applied Polymer Science*, vol.79,pp.1756-1763.
- [14] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา.2543 เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [15] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์.2527 เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ:คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โอเยนสโตร์
- [16] M.Tsukada, G.Freddi,M.Matsumuru, H.Shiozaki and N.Kasai. 1992. "Physical Properties and Dyeability of Silk Fibers Modified with Ethoxyethylmethacrylate Polymer" *Journal of Applied Polymer Science*, vol.44,pp. 799-805.
- [17] T.K. Maji, D. Basu, C.Datta and A. Banerjee. 1992. "Studies of Mechanical and Moisture Regain Properties of Methyl Methacrylate Grafted Silk Fiber" *Journal of Applied Polymer Science*, vol.84,pp. 969-974.
- [18] A.M. Ramadan, S. Mosleh and S.M. Gawish. 2004 "Weighting and Improvement of Silk Properties" *Journal of Applied Polymer Science*, vol.93,pp. 1743-1747
- [19] จิราธร บุญญา. 2550. "สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการย้อมติดสีของเส้นใยไหม(*Bombyx mori*) ที่ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต และไวนิลไตร 2-เมทอกซีเอทอกซีซีไอ-เดน". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] โรงเรียนบ้านท่ามะปริง . พอลิเมอร์ (การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน) .สืบค้นวันที่ 18 เมษายน 2552 . จาก www.thapring.com/Pingpong_web/Polymer.htm



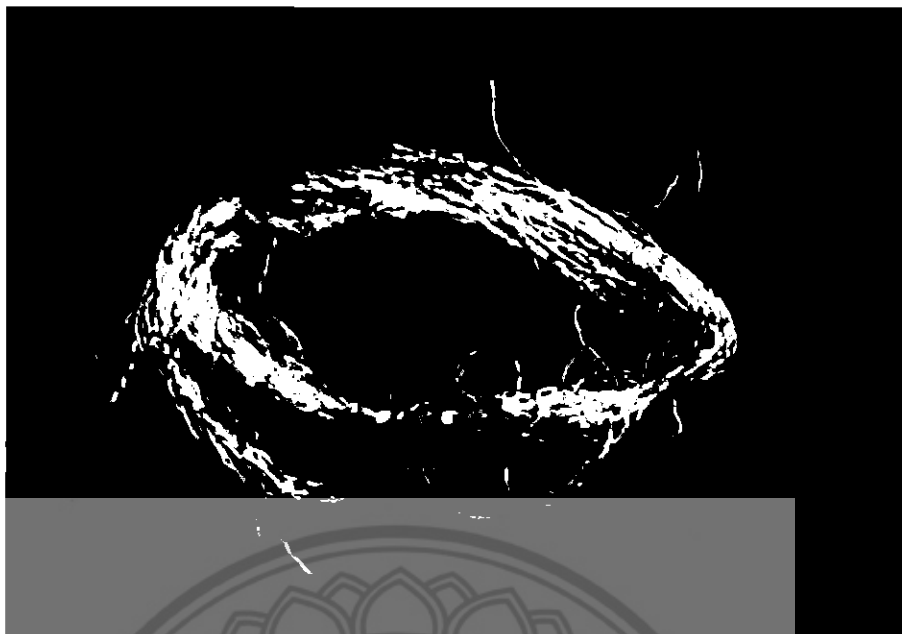
รูปเส้นใยไหม



รูปที่ ก.1 เส้นใยไหมดิบ



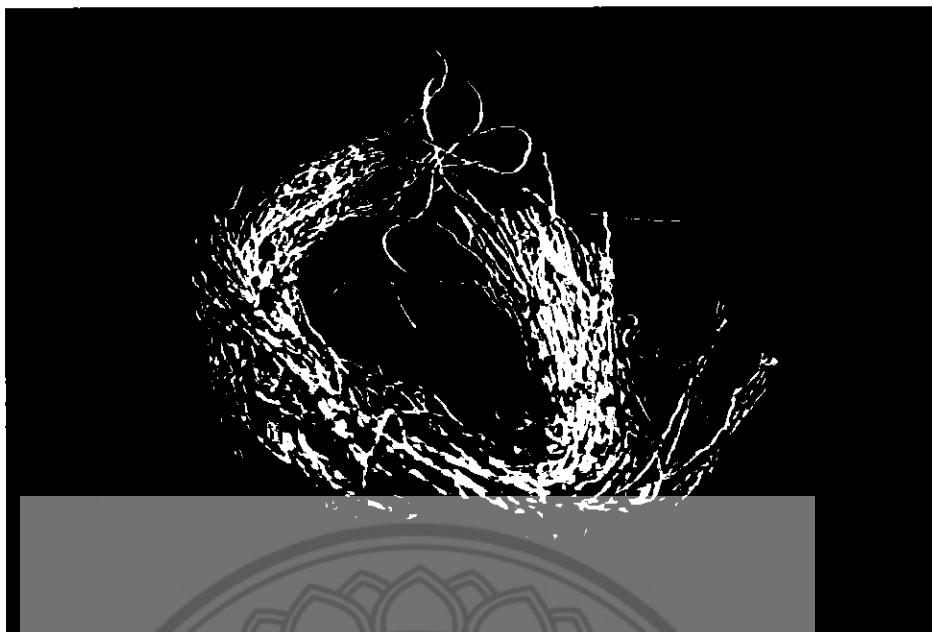
รูปที่ ก.2 เส้นใยไหมลอกขาว



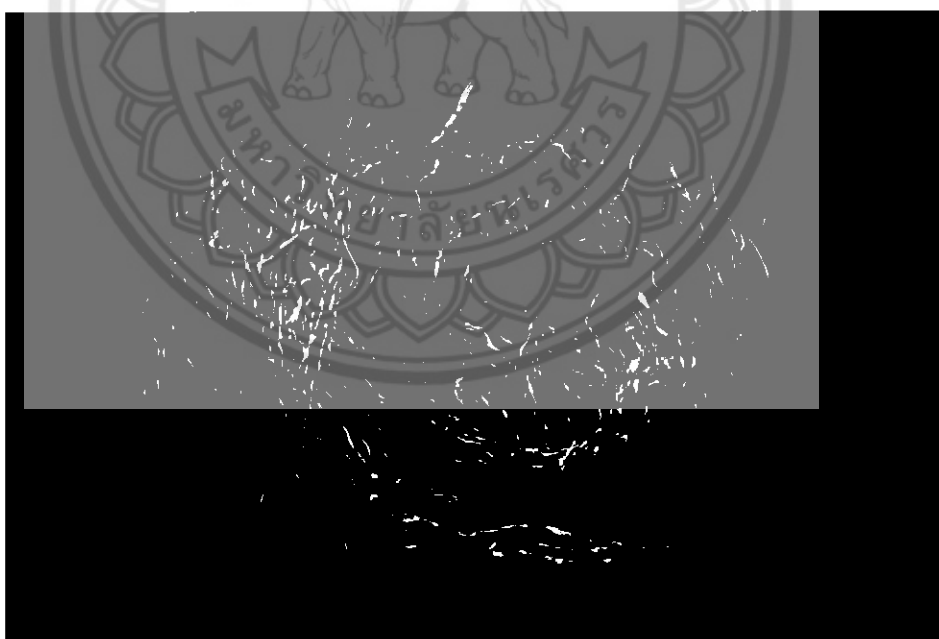
รูปที่ ก.3 เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA 0.2 โมล/ลิตร



รูปที่ ก.4 เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA 0.4 โมล/ลิตร



รูปที่ ก.5 เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA 0.6 โมล/ลิตร



รูปที่ ก.6 เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA 0.8 โมล/ลิตร



ตารางที่ ข.1 ความถี่การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ [20]

cm ⁻¹	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm ⁻¹ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm ⁻¹ (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm ⁻¹ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm ⁻¹ (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm ⁻¹ (w) 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm ⁻¹ อัลไคโนที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH ₃ , CH ₂ และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C≡N stretching	ไนไตรล์ (m)
2260-2100	C≡C stretching	อัลไคโน (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดกลูไทร์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1° เอมีด
1550-1510 (s)	N-H bending	2° เอมีด
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ความถี่การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ [20]

cm^{-1}	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1300-1150	$\text{CH}_2\text{-X}$	สารประกอบเฮไลด์เจน
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH_2)
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, $\text{R}_2\text{C=CH}_2$)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, $\text{R}_2\text{C=CHR}$)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรไมด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ: s = ความเข้มสูง , vs = ความเข้มสูงมาก , m = ความเข้มปานกลาง , w = ความเข้มต่ำ , ww = ความเข้มต่ำมาก

sh = แหลมคม , b = กว้าง , vb = กว้างมาก , OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)



ตารางที่ ค.1 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมดิบ

No.	Load (N)	% Elongation at Break (%)	Stress	
			ที่ 1 %Strain	ที่ 2 %Strain
1	10.50	46.12	3.13	6.00
2	11.17	45.49	3.10	6.53
3	10.33	45.84	2.90	6.53
4	11.33	46.12	3.13	6.83
5	11.00	45.70	3.13	6.00
6	11.33	45.12	3.10	6.83
7	10.83	45.84	3.10	6.83
8	11.33	45.70	3.10	6.00
9	11.33	46.12	3.13	6.53
10	11.00	45.12	3.10	6.00
ค่าเฉลี่ย	11.02	45.72	3.09	6.41
SD	0.3	0.2		

ตารางที่ ค.2 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมลอกขาว

No.	Load (N)	% Elongation at Break (%)	Stress	
			ที่ 1 %Strain	ที่ 2 %Strain
1	9.50	47.12	3.67	5.67
2	9.10	47.23	3.83	5.83
3	9.50	48.12	3.50	5.67
4	9.20	47.23	3.50	5.67
5	9.12	47.12	3.83	5.83
6	9.32	47.23	3.67	6.00
7	9.33	47.12	3.50	5.67
8	8.27	47.23	3.67	5.83
9	9.01	47.12	3.83	5.67
10	8.75	47.23	3.83	5.83
ค่าเฉลี่ย	9.11	47.28	3.68	5.77
SD	0.2	0.2		

ตารางที่ ค.3 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ค่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร

No.	Load (N)	% Elongation at Break (%)	Stress	
			ที่ 1 %Strain	ที่ 2 %Strain
1	9.23	45.15	3.33	5.66
2	9.18	45.19	2.66	4.95
3	9.20	45.36	3.50	5.83
4	9.22	45.44	2.80	5.83
5	9.19	45.33	3.33	6.07
6	9.18	45.25	3.70	6.00
7	9.22	45.23	2.79	5.17
8	9.18	45.25	2.50	4.83
9	9.20	45.30	2.33	5.67
10	9.25	45.27	3.19	5.50
ค่าเฉลี่ย	9.21	45.31	3.02	5.55
SD	0.02	0.1		

ตารางที่ ค.4 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ค่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร

No.	Load (N)	% Elongation at Break (%)	Stress	
			ที่ 1 %Strain	ที่ 2 %Strain
1	9.60	43.70	3.45	6.00
2	9.50	43.82	3.00	5.47
3	9.55	42.98	2.96	5.33
4	9.48	43.86	3.49	5.99
5	9.63	43.65	3.25	6.00
6	9.80	43.72	2.42	4.83
7	9.68	43.72	3.00	5.47
8	9.72	42.90	2.50	4.50
9	9.80	43.44	2.65	5.00
10	9.75	43.52	3.15	5.67
ค่าเฉลี่ย	9.65	43.54	2.99	5.43
SD	0.1	0.3		

ตารางที่ ค.5 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ค่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร

No.	Load (N)	% Elongation at Break (%)	Stress	
			ที่ 1 %Strain	ที่ 2 %Strain
1	10.22	39.98	3.67	6.34
2	10.19	40.32	3.67	6.26
3	10.21	40.44	3.33	6.02
4	10.23	40.95	3.18	5.83
5	10.21	40.42	3.66	6.33
6	10.12	40.35	3.21	5.83
7	10.21	40.49	3.00	6.67
8	10.18	40.50	2.99	5.67
9	10.20	40.45	2.99	5.67
10	10.15	40.55	3.35	6.00
ค่าเฉลี่ย	10.19	40.45	3.31	3.06
SD	0.3	0.2		

ตารางที่ ค.6 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ค่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.8 โมล/ลิตร

No.	Load (N)	% Elongation at Break (%)	Stress	
			ที่ 1 %Strain	ที่ 2 % Strain
1	10.11	42.98	3.00	5.83
2	10.13	43.14	2.17	5.17
3	10.05	42.89	3.33	6.17
4	10.08	42.75	2.50	5.00
5	10.02	43.12	1.17	4.00
6	10.10	43.23	3.50	6.17
7	10.06	42.92	3.17	6.17
8	10.10	42.95	2.83	6.00
9	10.15	43.11	2.83	5.50
10	10.10	43.05	3.33	6.16
ค่าเฉลี่ย	10.09	43.01	2.78	5.62
SD	0.03	0.1		