

สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ดัดแปลงด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและ
ความสามารถในการย้อมสีโดยใช้สีธรรมชาติ

PHYSICAL PROPERTIES OF SILKS (*BOMBYX MORI*) GRAFTED BY
2-HYDROXYETHYL METHACRYLATE AND ITS
DYEABILITY USING NATURAL DYES

เกวลิน ชันธุ์ชัยภูมิ

KEWALIN KHANCHAIYAPOOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของกรณีศึกษาของหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งทอ

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2006-SO-M-014-048

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและ
ความสามารถในการย้อมติดสีโดยใช้สีย้อมธรรมชาติ

PHYSICAL PROPERTIES OF SILKS (*BOMBYX MORI*) GRAFTED BY
2-HYDROXYETHYL METHACRYLATE AND ITS
DYEABILITY USING NATURAL DYES



เกวลิน ชันช์ชัยภูมิ

KEWALIN KHANCHAIYAPOOM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 95039
วัน,เดือน,ปี..... 20 พ.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-SC-M-014-048

**PHYSICAL PROPERTIES OF SILKS (*BOMBYX MORI*) GRAFTED BY
2-HYDROXYETHYL METHACRYLATE AND ITS
DYEABILITY USING NATURAL DYES**

KEWALIN KHANCHAIYAPOOM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN TECHNOLOGY POLYMER
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG**

2008

KMITL-2008-SC-M-014-048

COPYRIGHT 2008

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและความสามารถในการย้อมติดสีโดยใช้สีย้อมธรรมชาติ
Physical Properties of Silks (*Bombyx mori*) Grafted by 2-Hydroxyethyl methacrylate and Its Dyeability Using Natural Dyes

นักศึกษา นางสาวเกวลิน ชันช์ชัยภูมิ
รหัสประจำตัว 49067907
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ประชญาวารากร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี	ชัยศุภกิจสินธุ์	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ประชญาวารากร	
ผศ.ดร.ชลลดา	ฤตวิรุพห์	
รศ.ดร.ประณัฐ	โพธิยะราช	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 2 ตุลาคม 2551 เวลา 09.30 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 29เดือน.....ตุลาคม.....พ.ศ...2551...

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและความสามารถในการย้อมติดสีโดยใช้สีย้อมธรรมชาติ
นักศึกษา	นางสาวเกวลิน ชันธุ์ชัยภูมิ
รหัสประจำตัว	49067907
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมลอกกาวพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ที่ต่อกึ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งที่แตกต่างกันและศึกษาความสามารถในการย้อมติดสีเมื่อนำมาย้อมด้วยสีย้อมที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ ใบเตย (*Pandanus odoratus Ridi.*) ใบขี้เหล็ก (*Cassia siamea Lamk.*) และกาบมะพร้าวแห้ง (*Cocos nucifera Linn.*) และสีย้อมสังเคราะห์ ได้แก่ สีย้อมแอซิด หลังจากนั้นศึกษาความคงทนของสีต่อการซัก แสง เหงื่อและการขูดถู จากการศึกษาพบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นลักษณะเฉพาะของมอนอเมอร์ นอกจากนี้พบว่าเสถียรภาพทางความร้อน ความคงทนต่อการครูดและด่างและความคงทนต่อการขูดถูมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่ง แต่สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาว ส่วนความสามารถในการย้อมติดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ พบว่าความสามารถในการย้อมติดสีบนเส้นใยสูงขึ้นเมื่อเส้นใยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหลังการต่อกึ่งมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าเส้นใยไหมย้อมติดสีย้อมแอซิดได้ดีที่สุด เมื่อย้อมเส้นใยไหมด้วยใบขี้เหล็กโดยใช้สารช่วยติดสีในขณะย้อมพบว่าความคงทนของสีต่อการซัก แสง เหงื่อและการขูดถูมีค่าอยู่ในระดับที่สูงกว่าการย้อมเส้นใยไหมด้วยใบขี้เหล็กที่ไม่ใช้สารช่วยติดสี นอกจากนี้เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาวพบว่ามีความคงทนของสีต่อแสงสูงขึ้นเมื่อย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง มีความคงทนของสีต่อเหงื่อสูงขึ้นเมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กและมีความคงทนของสีต่อการขูดถูสูงขึ้นเมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบเตย

Thesis Title	Physical Properties of Silks (<i>Bombyx mori</i>) Grafted by 2-Hydroxyethyl methacrylate and Its Dyeability Using Natural Dyes
Student	Ms. Kewalin Khanchaiyapoom
Student ID.	49067907
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2551
Thesis Advisor	Asso. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

ABSTRACT

This research aimed to study properties of degumming silks (*Bombyx mori*) grafted with 2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA) containing different weight gains. In addition, dyeing properties were investigated by using natural dyestuffs i.e. coconut shell (*Cocos nucifera* Linn.), pandanus (*Pandanus odoratus* Ridi.), siamese cassia (*Cassia siamea* Lamk.) and synthetic dyestuffs i.e. acid dye. Fastness to washing, light, perspiration and rubbing of the degummed and grafted silks were finally examined. It was found that the IR spectra of the silk fibers grafted by HEMA exhibited the IR absorption band at 1700 cm^{-1} , attributed to the characteristic functionalities of monomer grafted onto the silks. Compared with the degummed silk fibers, thermal stability, acid and alkaline resistances and wear strength of the grafted silks were improved according to weight gain but the mechanical properties of the grafted silk fibers changed slightly. When dyeability and colorfastness properties were studied, it was found that higher weight gain of the HEMA-grafted silks exhibited greater dyeability degummed silks and the silk fibers showed the greatest dyeability when acid dye was applied. When the siamese cassia was applied with the alum mordant, the silk fibers showed better wash, light perspiration and rubbing fastness properties than the silks which were dyed without using the mordant. Moreover, the HEMA-grafted silk fibers showed better light, perspiration and rubbing fastness properties than the degummed silks when coconut shell, siamese cassia and pandanus were applied, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จุฑารัตน์
ปรัชญาวรากร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ความเอาใจใส่และให้ความรู้ที่ดีแก่
ข้าพเจ้าในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ รศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราชและ
ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ
จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

กราบขอบพระคุณ ผศ. ปิยนุช จริงจิตร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความรู้ที่ดี
แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณกัญญาณูช ศิลป์สุวรรณากุล ฝ่ายบริการลูกค้าประจำศูนย์วิเคราะห์ทดสอบ
สิ่งทอ สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ และความช่วยเหลือลดค่าทดสอบใน
การทดสอบความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณสุรินทร์ ศุภสวัสดิ์พันธ์ ผู้จัดการ โรงงานจิมทอมป์สัน ประเทศไทย ที่ได้ให้
ความอนุเคราะห์เส้นใยไหมดิบเพื่อใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณบุญเหลือ อักษรเลิศสวัสดิ์ ผู้ช่วยรองประธานบริหาร บริษัท Modern
Dyestuffs & Pigments ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมแอซิดและข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้ในการทำงาน
วิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำแนะนำ

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการ
อุดมศึกษา (สกอ.) ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอดและขอขอบคุณ
เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รัก
และเคารพยิ่งของข้าพเจ้าและคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เกวลิน ชันธุ์ชัยภูมิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไหมและสายพันธุ์ไหม.....	4
2.2 ประวัติและการแพร่กระจายของการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมของโลก.....	6
2.3 ประวัติและความเป็นมาของการเลี้ยงไหมในประเทศไทย.....	7
2.4 โครงสร้างของเส้นใยไหม.....	10
2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของไหม.....	11
2.4.2 โครงสร้างทางกายภาพของไหม.....	15
2.5 สมบัติของไหม.....	17
2.5.1 สมบัติทางกายภาพของไหม.....	17
2.5.2 สมบัติทางเคมีของไหม.....	19
2.6 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหม โดยวิธีทางเคมี.....	20
2.6.1 การลอกกาวไหม.....	21
2.6.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีการทางเคมี.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 สารให้สี.....	33
2.7.1 ผงสี.....	33
2.7.2 สีข้อม.....	33
2.8 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากธรรมชาติ.....	43
2.8.1 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากใบเตย.....	47
2.8.2 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากใบขี้เหล็ก.....	50
2.8.3 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากกามมะพร้าวแห้ง.....	51
2.9 เทคนิคการย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากธรรมชาติ.....	54
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	66
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้.....	66
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้.....	67
3.3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	68
3.3.1 ขั้นตอนการลอกกาวยไหม.....	69
3.3.2 ขั้นตอนการต่อกึ่งไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์.....	70
3.3.3 ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีข้อมธรรมชาติ.....	71
3.3.4 ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีข้อมสังเคราะห์.....	72
3.3.5 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติต่างๆ.....	73
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	81
4.1 กระบวนการต่อกึ่งเส้นใยไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์.....	81
4.1.1 ความสามารถในการต่อกึ่ง.....	81
4.1.2 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกึ่ง.....	83
4.2 สันฐานวิทยา.....	87
4.2.1 สันฐานวิทยาของไหมที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	88
4.2.2 สันฐานวิทยาของไหมที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน.....	90
4.3.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกท้าวและเส้นใยไหมดอ์กิ้ง.....	90
4.4 สมบัติทางความร้อน.....	91
4.5 สมบัติเชิงกล.....	94
4.6 ความคงทนต่อกรดและด่าง.....	96
4.7 ความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใย.....	97
4.8 กระบวนการย้อมสี.....	98
4.8.1 ความสามารถในการย้อมติดสี.....	99
4.8.2 การจัดการเปลี่ยนแปลงสี.....	105
4.9 การทดสอบความคงทนของสี.....	107
4.9.1 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไป.....	108
4.9.2 ค่าการเบี่ยงสีบนผ้าขาวมาตรฐาน.....	114
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	121
เอกสารอ้างอิง.....	122
ภาคผนวก ก. อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหม.....	129
ภาคผนวก ข. การวัดค่าสี.....	136
ประวัติผู้เขียน.....	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในไฟโบรอิน.....	11
2.2 ธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนในไฟโบรอิน.....	11
2.3 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ที่พบในเส้นใยไหม.....	15
2.4 กลุ่มของเอนไซม์โปรติเอสและตัวอย่างเอนไซม์.....	25
2.5 การเปรียบเทียบกระบวนการลอกกาวไหมด้วยเอนไซม์.....	26
2.6 การเปรียบเทียบน้ำหนักไหมที่สูญหายไปภายหลังการลอกกาวไหมด้วย Alkaline protease และ Thiol proteases.....	26
2.7 ตัวริเริ่มอนุมูลอิสระและอนุมูลิสลายตัว.....	30
2.8 ข้อเปรียบเทียบระหว่างสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์.....	42
2.9 ส่วนของพืชที่ให้สีไปใช้ประโยชน์.....	44
2.10 สีธรรมชาติที่ได้จากพืช.....	44
2.11 สีธรรมชาติที่ได้จากสัตว์.....	45
2.12 สีธรรมชาติที่ได้จากแร่ธาตุ.....	46
2.13 ชนิดของพืชที่นำมาย้อมไหมต่างๆ ที่มีระดับความคงทนตามมาตรฐานอุตสาหกรรม.....	46
2.14 สมบัติทางเคมีพื้นฐานของบาราคอล.....	51
2.15 ชนิดและคุณลักษณะของรงควัตถุที่ได้จากธรรมชาติ.....	54
3.1 สีที่ใช้ย้อมผ้าสีมาตรฐาน.....	77
4.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที.....	82
4.2 ลักษณะภายนอกของเส้นใยไหมหลังการต่อกึ่งด้วย HEMA เปรียบเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาว.....	83
4.3 สรุปแถบการดูดกลืนของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกึ่งด้วย HEMA.....	91
4.4 อนุมูลมีการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA.....	93
4.5 สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA.....	94
4.6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปในการละลายกรดและด่างของเส้นใยไหมลอกกาวและ เส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA.....	96
4.7 จำนวนรอบการขัดถูที่ทำให้เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกึ่งด้วย HEMA ขาด.....	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ Dye uptake ของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ.....	99
4.9 การวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ก่อนและหลังการเชื่อมด้วยสีย้อมแอซิด สีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง สีย้อมไบเคยและสีย้อมไบจีเหล็ก.....	105
4.10 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมแอซิด.....	108
4.11 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง.....	110
4.12 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบเคย.....	111
4.13 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็ก โดยใช้มอร์แคนท์.....	112
4.14 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็ก โดยใช้และไม่ใช้มอร์แคนท์.....	113
4.15 ค่าการเปลี่ยนสีบนผ้าขาวมาตรฐานของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ หลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักและเหงื่อ.....	114
4.16 ค่าการเปลี่ยนสีบนผ้าขาวแห้งและผ้าขาวเปียกของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ หลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก.....	117
ข-1 การวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ก่อนและหลังการเชื่อมด้วยสีย้อมแอซิด สีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง สีย้อมไบเคยและสีย้อมไบจีเหล็ก.....	136

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นใยไหมดิบ.....	10
2.2 สายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม.....	12
2.3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโน.....	12
2.4 การเกิดพันธะไอออนิกหรือ Salt linkage ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีน.....	12
2.5 โครงแบบแผ่นจิบเบตต้า (β -sheet) ของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไฟโบรอิน.....	13
2.6 ลักษณะโครงสร้างแอนติพาราเลลเบต้า-ชีท และพาราเลลเบต้า-ชีท.....	14
2.7 ภาคตัดขวางของเส้นไหมจากรังไหมและไฟโบรอินที่ถูกล้อมรอบด้วยกาวไหม.....	16
2.8 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยจากรังไหมดิบและไฟโบรอินของไหมเลี้ยงที่ลอกกาวแล้ว.....	16
2.9 โครงสร้างของเส้นใยไหม.....	17
2.10 พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ.....	32
2.11 พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม.....	32
2.12 พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม.....	32
2.13 พอลิเมอร์ร่วมแบบค่อกิ่ง.....	32
2.14 ตัวอย่างสีย้อมแอซิด C.I. Acid Blue 113.....	37
2.15 สูตร โครงสร้างทั่วไปของสีย้อมประเภทเบสิก.....	37
2.16 ไบเซย.....	47
2.17 สูตร โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี.....	48
2.18 สูตร โครงสร้างโมเลกุลของหมู่ไฟลิล.....	48
2.19 สูตร โครงสร้างโมเลกุลของฟิโอฟินินเอและฟิโอฟินินบี.....	49
2.20 การสลายตัวของคลอโรฟิลล์.....	49
2.21 ไบซีเหล็ก.....	50
2.22 สูตร โครงสร้างของบาราคอล.....	51
2.23 สูตร โครงสร้างของกรดแกลลิกและกรดเอลลาจิก.....	53
2.24 สูตร โครงสร้างของเคทิซิน.....	53
3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	69
3.2 ลักษณะในการเตรียมตัวอย่างเส้นใยไหมเพื่อทดสอบสมบัติทางแรงดึง.....	74
3.3 โคอะแกรมของ CIE L*a*b* Color Space.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ่กึ่งด้วย HEMA (% Weight gain) ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่ง.....	82
4.2 ปฏิกริยาการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งระหว่าง HEMA กับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นหมู่ข้างเคียงของกรดอะมิโนของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยไหม.....	85
4.3 ปฏิกริยาการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง HEMA กับหมู่เอไมด์ในสายโซ่หลักของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยไหม.....	87
4.4 สันฐานวิทยาของไหมลอกกาวและไหมตอ่กึ่งด้วย HEMA (กำลังขยาย 500 เท่า).....	88
4.5 สันฐานวิทยาของไหมลอกกาวและไหมตอ่กึ่งด้วย HEMA (กำลังขยาย 1500 เท่า).....	89
4.6 อินฟราเรดสเปกตร้าของไหมลอกกาวและไหมตอ่กึ่งด้วย HEMA.....	90
4.7 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA.....	92
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ่กึ่ง.....	95
4.9 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเชื่อมสีเส้นใยไหมลอกกาวด้วยสีย้อมแอซิดที่มีหมู่ซัลโฟนิคและหมู่คาร์บอกซิล.....	100
4.10 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเชื่อมสีเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA ด้วยสีย้อมแอซิดที่มีหมู่ซัลโฟนิคและหมู่คาร์บอกซิล.....	100
4.11 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสารให้สีหลักในสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งกับอะลูมิเนียมมอร์แคนท์และเส้นใยไหม.....	101
4.12 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสารให้สีหลักในใบเตยกับอะลูมิเนียมมอร์แคนท์และเส้นใยไหมและ โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ที่สูญเสียธาตุแมกนีเซียม (Mg^{2+}).....	102
4.13 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสารให้สีในสีย้อมใบขี้เหล็กกับอะลูมิเนียมมอร์แคนท์และเส้นใยไหม.....	103
4.14 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเชื่อมสีเส้นใยไหมลอกกาวด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กโดยไม่ใช้มอร์แคนท์และใช้มอร์แคนท์.....	104
4.15 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเชื่อมสีเส้นใยไหมตอ่กึ่งด้วย HEMA ด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กโดยไม่ใช้มอร์แคนท์และใช้มอร์แคนท์.....	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กลไกของสีกติดคบนผ้าขาวมาตรฐานในระหว่างการซัก.....	116
ก-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาว.....	129
ก-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA).....	129
ก-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใย ที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่ง 51.4%.....	130
ก-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA และมอร์แดนท์.....	130
ก-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมแอซิด.....	131
ก-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อม กามมะพร้าวแห้งโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะเชื่อม.....	131
ก-7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไอบีเค โดยใช้มอร์แดนท์ในขณะเชื่อม.....	132
ก-8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไอบีเค โดยใช้มอร์แดนท์ในขณะเชื่อม.....	132
ก-9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไอบีเค โดยปราศจากการใช้มอร์แดนท์.....	133
ก-10 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมแอซิด.....	133
ก-11 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมกามมะพร้าวแห้ง.....	134
ก-12 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมไอบีเค.....	134
ก-13 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมไอบีเค.....	135

รายการคำย่อ

ADC	Azobismethylpropionamide dihydrochloride
AIBN	Azo-bisisobutyronitrile
APS	Ammonium persulfate
DDSA	Dodecenylsuccinic anhydride
DMF	<i>N, N</i> -Dimethylformamide
DMSO	Dimethyl sulfoxide
DSC	Differential Scanning Calorimetry
ETMA	Ethoxyethyl methacrylate
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
HEMA	2 – Hydroxyethyl methacrylate
MAA	Methacrylamide
MMA	Methyl methacrylate
ODSA	Octadecenylsuccinic anhydride
OSBA	<i>o</i> -Sulfobenzoic anhydrides
HEMA	Poly(hydroxyethyl methacrylate)
PMMA	Poly(ethyl methacrylate)
SEM	Scanning Electron Microscope
Silane A-172	Vinyltris-(2-methoxyethoxy) silane
TEA	Triethylamine
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
VTMSi	Vinyltrimethoxy silane
XRD	X-ray Diffraction

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ไหมเป็นเส้นใยโปรตีนที่ได้จากธรรมชาติจัดเป็นเส้นใยที่มีค่าและสวยงามที่สุดชนิดหนึ่ง ไหมมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น แข็งแรงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติ ให้ความสบายในการสวมใส่ เพราะเส้นใยดูดซับความชื้นได้ดี แห้งเร็ว ไม่จับฝุ่นง่าย นำสัมผัส สามารถย้อมหรือพิมพ์สีได้หลายชนิด แต่ไหมมีข้อเสียบางประการด้วยกัน คือ ไหมจะอ่อนแอลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานานและถ้าได้รับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 175°C ไหมจะสลายตัวทันที นอกจากนี้การที่ไหมมีการกินตัวจากแรงอัดค้ำเมื่อเปียกเป็นข้อเสียที่ทำให้ผ้าไหมยับง่ายเมื่อเปียกหรือเมื่อผ่านการซัก ทำให้ดูแลรักษายาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของไหมเนื่องจากเส้นใยไหมคืบประกอบด้วยไฟโบรอินสองเส้นเกาะกันด้วยกาวไหม ดังนั้นจึงต้องทำการลอกกาวไหมออกก่อนแต่การลอกกาวไหมนั้นทำให้น้ำหนักของไหมลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้สมบัติบางประการของไหมต่ำลง ดังนั้นจึงมีการวิจัยพัฒนาไหมลอกกาวไหมมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งพัฒนาสมบัติบางประการของไหมให้ดีขึ้น โดยวิธีการตกแต่งสำเร็จทางเคมี (Chemical finishing) ได้แก่ การต่อกึ่งด้วยไวนิลมอนอเมอร์ เช่น การต่อกึ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) และเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) [1] ทำให้ไหมมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งโดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยไหม (% weight gain) มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์และเวลาที่ใช้ในการต่อกึ่ง โดยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ให้ % weight gain สูงกว่า MMA นอกจากนี้ไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีขึ้น มีความคงทนต่อกรดและด่างสูงขึ้นและการต่อกึ่งด้วย HEMA และ MMA นี้สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอซิด สีย้อมรีแอคทีฟ และสีย้อมขมื่นให้แก่ไหม อีกทั้งยังเพิ่มความคงทนของสีต่อแสงเมื่อย้อมด้วย สีย้อมสังเคราะห์ และไหมที่ต่อกึ่งด้วย MMA มีความคงทนของสีต่อการซักและแห้งสูงขึ้น

นอกจากไวนิลมอนอเมอร์ทั้ง 2 ข้างต้นยังมีมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่มีการนำมาต่อกึ่งกับเส้นใยไหม เช่น ไวนิลไตร 2-เมทอกซีเอทอกซีไซเลน (Vinyltris (2-methoxyethoxy)- silane, A-172) [2] โดยพบว่าไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้นเล็กน้อย มีเสถียรภาพทาง ความร้อนสูงขึ้นและสูงมากกว่าไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA แต่ไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีความชื้นรีเทนดิกว่า นอกจากนี้ไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 มีความคงทนต่อกรดสูงขึ้นและเมื่อนำมาย้อมด้วยสีย้อมจากครั่งและขมื่นพบว่ามีความคงทนของสีต่อการซักสูงขึ้นเช่นเดียวกับการต่อกึ่งด้วย HEMA แต่ไหมที่ต่อกึ่งด้วย Silane A-172 ให้ความสามารถในการย้อมติดสีลดลง

ปัจจุบันการค้นคว้าเกี่ยวกับอันตรายจากการใช้สีสังเคราะห์มีมากขึ้นทำให้ผู้บริโภคหันมาสนใจการใช้สีธรรมชาติซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของทั้งผู้ย้อมและผู้ใช้ และยังเป็น การช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย นอกจากนี้ผ้าที่ย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติมีสี สันสวยงาม ภูมิชีวิตชีวา ไม่ฉูดฉาด และมีสีอ่อนเย็นตากว่าสีสังเคราะห์ รวมทั้งการใช้สารเคมีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายอย่าง HEMA ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเส้นใยที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ช่วยปรับปรุงความสบายในการสวมใส่เพราะมอโนเมอร์ชนิดนี้มีส่วนที่ชอบน้ำสูงและจากการที่สามารถดูดซับน้ำไว้ได้ถึง 40 % อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ใส อ่อนนุ่ม [3] ทำให้มีการนำไปใช้ในงานด้านการแพทย์ด้วย เช่น คอนแทกเลนส์ชนิดรายวันและกระจกตาเทียม เป็นต้น

คั้งนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมลอกกาวพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ด้วยการต่อกิ่งกับ HEMA แล้วนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ หลังจากนั้นทำการศึกษาการย้อมติดสีด้วยสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์ที่แตกต่าง ไปจากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ สีย้อมที่ได้จากใบเตย (*Pandanus odoratus Ridi.*) ใบขี้เหล็ก (*Cassia siamea Lamk.*) กาบมะพร้าวแห้ง (*Cocos nucifera Linn.*) และสีย้อมแอซิด (Acid dye) โดยเลือกไหมต่อกิ่งที่มี % weight gain ที่แตกต่างกันมา ย้อมเพื่อศึกษาถึงผลของ % weight gain ที่มีต่อการย้อมติดสีและความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของความทนทานของสีต่อการขัดถูและอิทธิพลของสารช่วยติดสีที่มีต่อการย้อมติดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ คาดว่าเมื่อเส้นใยไหมผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA จะช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของไหมให้ดีขึ้น โดยปราศจากการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการวิจัยพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพเหมาะแก่การนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมโดยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมที่ได้หลังจากการต่อกิ่งด้วย HEMA

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมลอกกาวพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) โดยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA โดยใช้สภาวะในการต่อกิ่งที่แตกต่างกัน
- 1.3.2 ศึกษาสมบัติของเส้นใยไหมก่อนและหลังการต่อกิ่งด้วย HEMA ได้แก่ สัมฐานวิทยา การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมีและความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใย

1.3.3 ศึกษาความสามารถในการย้อมติดสีของเส้นใยไหมก่อนและหลังการตอกลงด้วย HEMA เมื่อใช้สีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์ ได้แก่ สีย้อมจากใบเตย (*Pandanus odoratus Ridi.*) สีย้อมจาก ใบขี้เหล็ก (*Cassia siamea Lamk.*) สีย้อมจากกามมะพร้าวแห้ง (*Cocos nucifera Linn.*) และ สีย้อมแอซิด (Acid dye)

1.3.4 ศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยไหมหลังจากการตอกลงด้วย HEMA ที่มีต่อความสามารถในการย้อมติดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ได้แก่ การซัก แสง เหงื่อ และการขัดถู

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยติดสีที่มีต่อความสามารถในการย้อมติดสีย้อมใบขี้เหล็กและความคงทนของสีย้อมใบขี้เหล็กต่อสภาวะต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหม ทำให้ได้เส้นใยที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากขึ้น

1.4.2 สามารถก่อให้เกิดการส่งเสริมการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติ ทำให้เห็นคุณค่าของ สีย้อมธรรมชาติ ทำให้สามารถช่วยลดการซื้อสีย้อมสังเคราะห์จากต่างประเทศ ไม่ก่อให้เกิดการเสียดุลทางการค้าและลดการพึ่งพาดตลาดสากล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไหมและสายพันธุ์ไหม (Silks) [1-2, 4-9]

ไหม คือ เส้นใยที่พ่นออกมาจากปากของตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัยเพื่อมาห่อหุ้มตัวป้องกันศัตรูทางธรรมชาติ เกิดจากการที่ตัวหนอนไหมโตเต็มวัยเริ่มเป็นดักแด้พ่นของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อมภายในตัวหนอน สารละลายนี้จะถูกอัดผ่านท่อสองท่อในหัวของตัวหนอนไหมไปสู่บริเวณที่เป็นรูเล็กๆ ส่วนที่เป็นของเหลวหนืดซึ่งเป็นไฟโบรอิน (Fibroin) จะถูกเคลือบด้วยโปรตีนอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นกาวไหมหรือที่เรียกว่าเซรีซิน (Sericin) ทำให้เส้นใย 2 เส้นติดกัน โปรตีนทั้งสองชนิดยึดติดกัน โดยการสัมผัสกับอากาศทำให้แข็งตัวและเกิดเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง หนอนไหมเป็นแมลงชนิดหนึ่งซึ่งมีการเจริญเติบโตจากไข่ไหม (ขนาดเท่าเมล็ดงา) และเป็นตัวหนอนไหม ในขณะที่เป็นตัวหนอนไหมจะเจริญเติบโตโดยการลอกคราบประมาณ 3-4 ครั้ง ในระยะเวลาประมาณ 20-22 วัน และจะมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น 10,000 เท่า โดยการกินอาหารเพียงอย่างเดียว คือ ใบหม่อน และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะหยุดกินอาหารแล้วพ่นเส้นใยออกมาห่อหุ้มตัวเองที่เราเรียกว่ารังไหม ซึ่งมีลักษณะกลมรีคล้ายเมล็ดถั่วและหากเรานำรังไหมมาต้มในน้ำที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 80°C ขึ้นไป จะสามารถทำให้กาวไหม (Sericin) อ่อนตัวและดึงออกมาเป็นเส้นยาวได้ ความยาวของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และการดูแลในช่วงที่เป็นหนอนไหม

เส้นใยไหมได้ชื่อว่าเป็น “ราชินีแห่งเส้นใย” เนื่องจากไหมเป็นเส้นใยที่มีเอกลักษณ์ไม่เหมือนเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น มีความสวยงาม ดูหรูหรา และมีคุณค่าด้วยการที่ไหมมีความเงามันนุ่มนวล มีการทิ้งตัวที่ดี ดูจับความชื้นได้ดีประมาณ 11% แห้งง่าย ไม่เหนียวเหนอะหนะ ทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบาย มีพื้นผิวที่เรียบทำให้ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกเปื้อนติดได้ยาก มีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ จึงยังคงทำให้ไหมได้รับความนิยมตลอดกาล อย่างไรก็ตาม การที่ไหมมีการคืนตัวจากแรงอัดต่ำเมื่อเปียก (Low wet resiliency) จึงเป็นข้อเสียที่ทำให้ผ้าไหมยับง่ายเมื่อเปียกหรือเมื่อผ่านการซัก ดูแลรักษายากและได้สร้างความรำคาญให้แก่ผู้สวมใส่หรือบางครั้งอาจพบว่าผลิตภัณฑ์ผ้าไหมมีสีตกเมื่อนำมาซักล้าง เราจึงยังคงเห็นความพยายามของบุคคลหลายฝ่ายในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพรูปแบบของไหมให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า โดยยังคงเอกลักษณ์ของความเป็นไหมไว้

เส้นใยไหมจะมีความยาวต่อเนื่อง (Filament) ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาวต่างจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น เช่น ฝ้าย ขนสัตว์ ลิ้นจี่ล้วนเป็นเส้นใยสั้น (Staple fiber) ไหมเป็นเส้นใยที่ได้จากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ แต่ไม่เหมือนกับเส้นใยขนสัตว์ คือ เส้นใยไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนน้อยมาก โดยทั่วไปสามารถจำแนกไหมออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ไหมเลี้ยง (Mulberry silk) หรือ ไหมบอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงกันภายใต้ภาวะการควบคุมโดยให้อาหาร คือ ใบหม่อน (Mulberry leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้มีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาวจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าพันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ พันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) และสำหรับไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยงซึ่งเป็นตัวอ่อนของผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่ง เป็นแมลงในอันดับเลพิโดปเทอร่า มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* และมีชื่อสามัญว่า Silk worm วงศ์ Bombycidae นิยมเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของไทย ซึ่งไหมไทยจะมีลักษณะเส้นใยที่มีสีเหลืองและค่อนข้างหยาบ มีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึง 38% มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆที่ปกติมีกาวไหมเพียง 20-25% เท่านั้น ทำให้เส้นใยไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อทอผ้า ปัจจุบันการเลี้ยงไหมและการผลิตไหมได้รับการส่งเสริมให้ทำเป็นระบบอุตสาหกรรมแบบ Sericulture ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่นแต่มีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากเส้นใยไหมไทยมีสีเหลืองและค่อนข้างหยาบ

2. ไหมป่า (Wild silk) เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นไหมทาชาร์ (Tussah silk) มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีนและอินเดีย กินใบโอ๊กเป็นอาหาร หนอนพวกนี้เจริญเติบโตเองจะเก็บรังดักแด้ได้จากต้นไม้ ซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล หยาบและไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง

นอกจากนี้สายพันธุ์ไหมในโลกนี้ยังแบ่งตามมาตรฐานของนักวิทยาศาสตร์ด้วย เช่น แบ่งตามจำนวนครั้งในการลอกคราบของหนอนไหม แบ่งตามสีของรังไหม แบ่งตามรูปร่างของรังไหม แบ่งตามถิ่นกำเนิด และแบ่งตามจำนวนครั้งในการฟักของไข่ไหมใน 1 ปี

การแบ่งตามจำนวนครั้งในการฟักไข่ใน 1 ปี อาจจะมี 1 ครั้งหรือหลายครั้ง ซึ่งลักษณะของสายพันธุ์ที่มีการฟักไข่ไหมที่ต่างกัน บ่งบอกถึงลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันไปด้วย รวมทั้งผลจากสภาพแวดล้อมก็จะแตกต่างกันไปด้วยตามสายพันธุ์ ในปัจจุบันสามารถใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการฟักของไข่ไหมสายพันธุ์ที่ฟักปีละ 1 ครั้ง เราสามารถฟักได้หลายครั้งขึ้นตามความต้องการ แต่ประเด็นของการแบ่งในลักษณะนี้ คือ พันธุกรรมที่อยู่ในแต่ละสายพันธุ์ที่ไม่เหมือนกัน คือ

1. **Monovoltine (ฟักปีละ 1 ครั้ง)** เป็นพันธุ์ที่อยู่ในแถบอากาศหนาว เช่น ประเทศในแถบยุโรป หนอนไหมจะมีอายุยาวกว่าสายพันธุ์อื่น หนอนไหมตัวใหญ่ เส้นไหมมีคุณภาพดี แต่หนอนไหมไม่แข็งแรง โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนชื้น ความยาวเส้นใยไหมต่อรังประมาณ 1,200-1,500 เมตร

2. **Bivoltine (ฟักปีละ 2 ครั้ง)** เป็นพันธุ์ที่อยู่ในแถบอากาศอบอุ่น เช่น จีน ญี่ปุ่น เกาหลี เป็นต้น หนอนไหมมีอายุสั้นกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ Monovoltine หนอนไหมแข็งแรง แต่เส้นไหมมีคุณภาพดีน้อยกว่า Monovoltine ดังนั้นจึงนิยมนำมาผสมกับ Monovoltine เพื่อให้ได้พันธุ์ไหมที่มี

คุณภาพเส้นที่ดีขึ้น รังไหมมีสีขาวเหมาะสำหรับเลี้ยงในประเทศในเขตอบอุ่นและนิยมเลี้ยงในฤดูร้อนของประเทศในเขตอบอุ่น ความยาวเส้นไหมต่อรังประมาณ 1,000-1,200 เมตร

3. **Polyvoltine** (ฟักปีละหลายครั้ง) เป็นพันธุ์ไหมที่อยู่ในแถบอากาศร้อนชื้น เช่น ไทย ลาว หนองไหมมีอายุสั้นกว่าทั้ง 2 สายพันธุ์ข้างต้น และมีความแข็งแรงมาก รังมีขนาดเล็ก รังไหมมีทั้งสีขาวและสีเหลือง สามารถสาวเป็นเส้นไหมได้ปริมาณน้อย แต่เส้นไหมมีความมันเงาสูงแต่จะมีปมปมมาก และเป็นสายพันธุ์ที่ไม่สามารถ Hibermate (จำศีล) ได้เหมือน 2 สายพันธุ์ข้างต้น ดังนั้นไขไหมจึงไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้ ต้องใช้ไขไหมต่อเนื่องทั้งปี ความยาวเส้นไหมต่อรังประมาณ 200-400 เมตร

ดังนั้นสายพันธุ์ไหมที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน จึงมีการนำสายพันธุ์ต่างๆมาผสมกันเพื่อให้ได้ลูกผสมที่ตรงตามความต้องการ และลูกผสมที่ได้รับความนิยมในการพัฒนาสายพันธุ์ คือ ลูกผสมของพันธุ์จีนกับพันธุ์ญี่ปุ่น ซึ่งอาจจะเป็น Bivoltine อย่างเดียวกันหรือมีการผสมโดยเลือกของ Monovoltine เข้าไปบ้างเพื่อให้รังไหมมีขนาดใหญ่ขึ้น เส้นไหมมีความยาวมากขึ้นและคู่ผสมที่น่าจับตามองอีกคู่หนึ่งก็คือการนำสายพันธุ์ Polyvoltine ไปผสมกับสายพันธุ์ Bivoltine จนสามารถได้ลูกผสมที่มีความยาวเส้นไหมต่อรังที่ 900-1,200 เมตร รังมีขนาดใหญ่ หนองไหมแข็งแรงสามารถเลี้ยงได้ในสภาพอากาศร้อนชื้น รังไหมที่ได้อาจมีทั้งสีขาวหรือสีเหลืองแล้วแต่ความต้องการในการพัฒนาและที่สำคัญเส้นไหมที่ได้จะมีความมันเงาสูง เส้นเรียบสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นไหมจากพันธุ์ลูกผสมอื่นๆ จึงน่าจะเป็นอนาคตของอุตสาหกรรมไหมไทยที่จะหันมาพัฒนาสายพันธุ์และส่งเสริมการใช้เส้นไหมที่เป็นทั้งพันธุ์ไทยพื้นเมืองที่มีเอกลักษณ์ดั้งเดิมของไทย และการส่งเสริมการใช้เส้นไหมที่มีการพัฒนาจากพันธุ์ไทยที่เป็นลูกผสมที่จะสามารถนำมาทำเป็นสินค้าได้หลากหลาย สามารถใช้เป็นเส้นยืนได้ ทำให้สร้างความแตกต่างให้กับสินค้าไหมไทยได้ด้วย

2.2 ประวัติและการแพร่กระจายของการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมของโลก [10]

การปลูกหม่อนเลี้ยงไหม สันนิษฐานว่าเริ่มต้นในประเทศจีนเมื่อประมาณ 4,700 ปีมาแล้ว มีตำนานเล่าว่าพระนางซีหลิงสี (Xi Ling Shi) พระมเหสีของจักรพรรดิชวุนหยวน (Xaun Yaun) ได้พบรังไหมโดยบังเอิญ ขณะประทับในพระราชอุทยาน พระนางทรงเห็นรังไหมอยู่บนต้นหม่อนลักษณะเป็นรังสีขาวนวลจึงให้นางกำนัลเก็บมาถวาย แต่นางกำนัลทำรังไหมตกลงในถ้วยน้ำร้อนโดยอุบัติเหตุ เมื่อคิ่งรังไหมขึ้นมาก็ได้เส้นใยที่เลื่อมมันและอ่อนนุ่มจึงลองนำเส้นใยที่ได้ไปทอเป็นผ้าเพื่อถวายพระจักรพรรดิซึ่งพระองค์ทรงโปรดปรานมาก จึงโปรดให้มีการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมในพระราชวัง ต่อมาจึงนำออกเผยแพร่ให้แก่ราษฎรทั่วไป ราษฎรจึงขนานนามพระนางซีหลิงสีว่า **“พระนางแห่งไหม”** และจัดให้มีการเซ่นไหว้เป็นประจำทุกปี

ต่อมาราชวงศ์ฮั่น (ในราวปี 206 ก่อนคริสตกาลจนถึงคริสต์ศักราช 220) ได้มีการส่งทูตไปเชื่อมสัมพันธไมตรีกับประเทศทางตะวันตกโดยเริ่มต้นจากเมืองฉางอัน (Changan) ปัจจุบันเรียกซีอาน (Xian) ซึ่งเป็นเมืองหลวงอยู่ในมณฑลชานซี (Shaanxi) ผ่านมณฑลกั้นสู (Kunshu) มณฑลซินเจียง (Xinjiang) ข้ามเทือกเขาพามิร์ (Pamir) สูประเทศอัฟกานิสถานและอิหร่าน อีกเส้นทางหนึ่งจะเดินทางผ่านทางตอนใต้ของประเทศรัสเซียเข้าสู่ประเทศเอเชียกลางไปยังประเทศแถบชายฝั่งทะเลเมดิเตอร์เรเนียนเส้นทางเหล่านี้ยาวมากกว่า 10,000 กิโลเมตร เป็นเส้นทางแลกเปลี่ยนวัฒนธรรมและการค้าระหว่างประเทศจีนและประเทศในเอเชียกลางในยุคนี้เส้นทางนี้รู้จักในนาม “เส้นทางไหม” (Silk road)

นอกจากนี้ในช่วงระยะเวลาเดียวกันยังมีการแพร่กระจายโดยการเดินทางทางทะเลไปยังคาบสมุทรเปอร์เซียและประเทศแถบชายฝั่งทะเลอาหรับ (Arabian sea) หลังจากนั้นจึงแพร่กระจายไปยังประเทศอื่น

ช่วงประมาณ 3,000 ปีมาแล้ว การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมแพร่กระจายจากประเทศจีนไปยังประเทศเกาหลีหลังจากนั้นอีกประมาณ 300 ปีได้แพร่กระจายจากประเทศเกาหลีไปสู่ประเทศญี่ปุ่น

ช่วงประมาณคริสตกาล การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมแพร่กระจายไปสู่ประเทศอินเดียและคาบสมุทรอินโดจีน ได้แก่ ประเทศไทย พม่า ลาว เวียดนาม และกัมพูชา ต่อจากนั้นจึงแพร่กระจายไปสู่ประเทศอินโดนีเซีย

ช่วงประมาณศตวรรษที่ 9-11 การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมแพร่กระจายไปสู่ประเทศอียิปต์ประเทศชายฝั่งทางตอนเหนือของทวีปแอฟริกา ประเทศสเปน และเกาะซิติ นอกจากนี้ยังมีการแพร่กระจายไปยังแถบทางใต้ของประเทศรัสเซีย ซึ่งเป็นบริเวณที่เส้นไหมเดินทางผ่าน

ช่วงประมาณศตวรรษที่ 12-13 การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมแพร่กระจายไปสู่ประเทศอิตาลี

ช่วงประมาณศตวรรษที่ 14 การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมแพร่กระจายไปสู่ประเทศฝรั่งเศสประมาณปี ค.ศ. 1522 การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมแพร่กระจายไปสู่ทวีปอเมริกาโดยสเปน ซึ่งได้เข้าไปปกครองเม็กซิโก ผู้ปกครองชาวสเปนได้บังคับให้ราษฎรแถบซานเมื่องปลูกหม่อนและเลี้ยงไหม หลังจากนั้นได้แพร่กระจายไปยังประเทศในแถบทวีปอเมริกาเหนือและทวีปอเมริกาใต้ เช่น สหรัฐอเมริกา เปรูและบราซิล

2.3 ประวัติและความเป็นมาของการเลี้ยงไหมในประเทศไทย [10]

การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมในประเทศไทยเริ่มต้นตั้งแต่เมื่อใดไม่สามารถยืนยันได้ แต่พอสันนิษฐานได้ว่าคงกระทำกันมานานแล้วอาจจะ โดยคนไทยที่อพยพลงมาจากประเทศจีนได้นำไข่ไหมและพันธุ์หม่อนติดเข้ามาด้วย การเลี้ยงไหมในสมัยนั้นไม่ทำกันเป็นล้าเป็นสัน นอกจากจะเลี้ยงไว้เพื่อทอเป็นเครื่องนุ่งห่มไว้ใช้เองเท่านั้น จนกระทั่งมาถึงในรัชสมัยของพระบาทสมเด็จพระ

พระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 ได้มีการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมกันทั่วไป โดยเฉพาะภาคอีสานมีการเลี้ยงไหมมากที่สุดแต่เส้นไหมที่ทำได้นั้นหยาบไม่สม่ำเสมอจะนำไปใช้ทอเป็นผ้าอย่างดีไม่ได้ ต้องมีการสั่งซื้อไหมดิบและผ้าไหมชนิดต่างๆ จากต่างประเทศเข้ามาใช้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นพระองค์จึงทรงมีพระราชดำริ จะบำรุงอุดหนุนการทำไหม เพื่อให้เพียงพอแก่การอุปโภคภายในประเทศโดยไม่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ

ดังนั้นในปี พ.ศ. 2444 กระทรวงเกษตรราธิการซึ่งมีเจ้าพระยาเทเวศรวงษ์วิวัฒน์เป็นเสนาบดีได้จ้างผู้เชี่ยวชาญการปลูกหม่อนและเลี้ยงไหมชาวญี่ปุ่น โดยมีศาสตราจารย์โทยาม่า (Kametarō Toyama) เป็นหัวหน้าคณะเข้ามาทำการสำรวจหาเส้นทางในการปรับปรุงการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมของไทย

ปี พ.ศ. 2445 กระทรวงเกษตรราธิการได้ให้คณะผู้เชี่ยวชาญหม่อนไหม สาวไหม เพื่อหาความรู้สำหรับใช้เป็นแนวทางพิจารณาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมในประเทศไทย ส่วนด้านการสาวไหม รัชกาลที่ 5 ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ข้าหลวงในสมเด็จพระพันปีหลวงฝึกหัดใช้เครื่องสาวไหมของญี่ปุ่นชนิดหมุนด้วยมือและใช้เท้าเหยียบ

ปี พ.ศ. 2446 รัชกาลที่ 5 ได้ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ตั้งกรมช่างไหมขึ้น โดยมีพระเจ้าลูกยาเธอพระองค์เจ้าเพ็ญพัฒนพงษ์เป็นอธิบดี ที่ว่าการตั้งอยู่ที่ตำบลทุ่งศาลาแดงโดยกรมช่างไหมจะมีหน้าที่ดังนี้

1. จัดการบำรุงพันธุ์ไหมที่เลี้ยงแล้วให้ดีขึ้น
2. แนะนำให้ราษฎรทำสวนหม่อนและเลี้ยงไหมตามแบบวิธีการอย่างใหม่
3. ฝึกหัดให้ราษฎรสาวเส้นไหมตามวิธีใหม่ โดยใช้เครื่องสาวไหมชนิดสามัญของญี่ปุ่นที่ใช้หมุนด้วยมือหรือเท้าเหยียบ
4. แก้ไขเปลี่ยนแปลงเครื่องทอผ้าให้ดีขึ้นและฝึกหัดราษฎรให้รู้จักการทอผ้าชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้กันทั่วไป

ปี พ.ศ. 2447 ตั้งสาขากองช่างไหมขึ้นที่มณฑลนครราชสีมาและเปิดโรงเรียนช่างไหมขึ้นที่ตำบล ทุ่งศาลาแดง

ปี พ.ศ. 2448 กรมช่างไหมได้ตั้งสาขาขึ้นอีกแห่งหนึ่งที่บุรีรัมย์ เรียกว่า กองช่างไหมเมืองบุรีรัมย์

ปี พ.ศ. 2450-2452 กรมช่างไหมได้ทดลองส่งเจ้าพนักงานชาวญี่ปุ่นออกไปสอนการทำสวนหม่อน การเลี้ยงไหมและการสาวไหม ตามวิธีสมัยใหม่ซึ่งได้ทดลองแล้วพบว่าดีกว่าวิธีเก่าที่ราษฎรปฏิบัติกันอยู่ ให้แก่ราษฎรในอำเภอพุทไธสง มณฑลนครราชสีมา จากการทดลองสอนพบว่ามีความเป็นไปได้จึงได้ทำการสอนเพิ่มอีก 3 อำเภอ คือ

1. อำเภอรัตนบุรี
2. อำเภอสุวรรณภูมิ

3. อำเภอพัทธภูมิพิสัย

นอกจากสอนการทำไหมแล้ว กรมช่างไหมยังมีแผนจะแจกพันธุ์ไหมให้แก่ราษฎรปีละ 3-4 ครั้ง โดยในครั้งแรกได้แจกเมื่อเดือนพฤษภาคม รศ. 127 (พ.ศ. 2452) ให้แก่ราษฎรในอำเภอพุทไธสง 110 คน อำเภอรัตนบุรี 84 คน ได้รับคนละตั้งแต่ 25 แม่พันธุ์ขึ้นไป

ปี พ.ศ. 2453-2454 กรมช่างไหมได้สอนการทำไหมเพิ่มขึ้นอีก 6 แห่ง ได้แก่

1. เมืองอุบล
2. เมืองร้อยเอ็ด
3. เมืองสุรินทร์
4. เมืองชัยภูมิ
5. อำเภอศรีสะเกษ
6. อำเภอจตุรัส

ปี พ.ศ. 2455 กระทรวงเกษตรราธิการได้ยกเลิกกรมช่างไหมและสาขาต่างๆ เนื่องจากรัฐบาลให้เหตุผลว่ารัฐบาลได้สิ้นเปลืองเงินในการอุดหนุนงานนี้มากเป็นเงินจำนวนล้านบาท แต่ผลที่ได้ไม่มีอะไร รัฐบาลจึงได้ตกลงเลิกบำรุงการทำไหม เพื่อจะได้นำเงินไปใช้บำรุงกิจการอย่างอื่น หลังจากนั้นการส่งเสริมการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมได้ชะงักไป แต่ราษฎรก็ยังคงเลี้ยงไหมกันเป็นประเพณีสืบต่อกันไป

ปี พ.ศ. 2475 ทางราชการได้กลับมาพิจารณาเรื่องไหมอีกครั้ง โดยการจัดตั้งโรงงานสาวไหมขึ้นที่จังหวัดนครราชสีมาโดยกระทรวงเศรษฐการได้ซื้อเครื่องจักรจากประเทศอิตาลีขนาด 48 อ่าง สาวได้เส้นไหมอ่างละ 600 กรัม ต่อ 10 ชั่วโมง มีผู้อำนวยการติดตั้งและสอนการเดินเครื่องจักรเป็นเวลา 8 เดือน ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2480 และทดลองทำงานครั้งแรกเมื่อ 15 มีนาคม 2486 แต่โรงงานนี้ต้องประสบปัญหาทางวัตถุดิบ เนื่องจากราษฎรไม่ชำนาญในการเลี้ยงไหมพันธุ์ต่างประเทศที่เหมาะสม จะใช้สาวโดยเครื่องจักร และช่างประจำโรงงานก็ไม่มีควมชำนาญพอที่จะตัดแปลงเครื่องจักรให้สามารถสาวรังไหมพื้นเมืองได้ กิจการจึงกระทบกระเทือนมาจนเกิดมหาสงครามเอเชียบูรพาขึ้น จึงต้องหยุดกิจการไปในปี พ.ศ. 2498

ปี พ.ศ. 2484 กรมเกษตรและกรมประมงตั้งหมวดส่งเสริมการเลี้ยงไหมขึ้น 5 แห่ง คือ หมวดการเลี้ยงไหมปากช่อง พุทไธสง หนองคาย ชนบทและร้อยเอ็ด สังกัดกองพืชพันธุ์ โดยมีหม่อมเจ้าลักษณะกร เกษมสันต์ เป็นหัวหน้ากอง

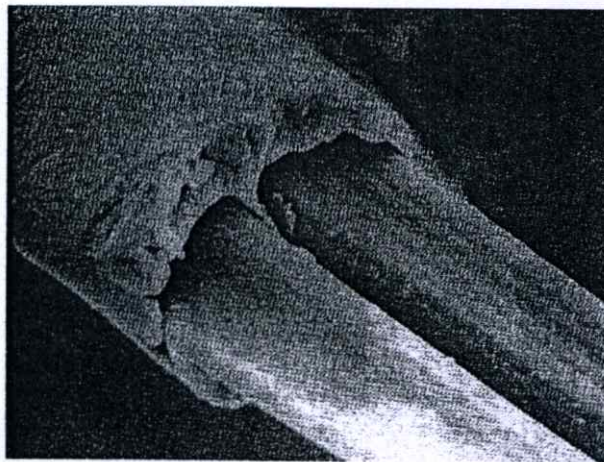
ปี พ.ศ. 2500 กรมกสิกรรมได้โอนแผนกส่งเสริมการเลี้ยงไหมมาขึ้นอยู่กับกองการค้นคว้าและทดลอง มีหน้าที่ศึกษาวิจัยปรับปรุงพันธุ์หม่อนและพันธุ์ไหม ปัจจุบันเป็นสถาบันวิจัยหม่อนไหม กรมวิชาการเกษตร

ต่อมาปี พ.ศ. 2511 ได้มีการสถาปนากรมส่งเสริมการเกษตรขึ้นเป็นกรมหนึ่งในกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ งานด้านการส่งเสริมการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมก็ได้เป็นแผนกงานหนึ่งของกรม

ซึ่งในปัจจุบันคือกลุ่มส่งเสริมการผลิตหม่อนไหมสำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตรกรรมส่งเสริมการเกษตร มีหน้าที่ดำเนินการส่งเสริมการผลิตปลูกหม่อนเลี้ยงไหมด้านการตลาดหม่อนไหมไทย

2.4 โครงสร้างของเส้นใยไหม (Structure of Silk Fibers) [5-7, 9, 11]

เส้นไหมเป็นเส้นใยโปรตีนที่ได้จากธรรมชาติและเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาว (Filament) เส้นใยไหมจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ไฟโบรอิน (Fibroin) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเส้นใย ซึ่งมีสองเส้นประมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ที่เกาะติดกันและเคลือบด้วยกาวไหม หรือที่เรียกว่า Sericin ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ดังนั้นกาวไหมจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดติดเส้นใยไฟโบรอินสองเส้นเข้าไว้ด้วยกันดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ในเส้นไหมจะมีไขมันและน้ำมันอยู่ประมาณ 0.5-1% และสารสีธรรมชาติประมาณ 1-1.4% ปริมาณของกาวไหมจะขึ้นกับพันธุ์ไหม เช่น ไหมเลี้ยงพันธุ์ *Bombyx mori* หรือ Mulberry silk จะมีกาวไหม 20-30% ในขณะที่ไหมป่าพันธุ์ Tussah จะมีกาวไหม 5-15% ดังนั้นเมื่อจะทำการสาวเส้นไหมจากรังไหมจะต้องนำรังไหมไปต้มเพื่อทำให้รังไหมอ่อนนุ่มสม่ำเสมอจนตลอดทั้งรัง และกาวไหมบางส่วนจะละลายออกไปทำให้สาวหาเงื่อนได้ง่ายและไม่ขาดบ่อยเพราะเส้นใยคลายตัวออกอย่างเป็นระเบียบส่งผลให้สามารถสาวไหมออกจากรังได้ง่าย มีปริมาณเศษไหมชั้นนอก เศษไหมชั้นในและรังไหมที่สาวไม่ออกเหลือน้อยที่สุด รังไหมของหนอนไหมแต่ละรังจะสามารถสาวเป็นเส้นใยซึ่งมีความยาวต่อเนื่องได้ประมาณ 1500 ฟุต หรือ 500 หลา (*Bombyx mori*) เป็นพันธุ์ของหนอนไหมที่มีคุณภาพดีที่สุดนิยมใช้อย่างกว้างขวางและพบในเขตตะวันออกไกล สำหรับเส้นใยที่ขาดไม่มีความยาวต่อเนื่องหรือที่เป็น ส่วนด้านในของรังที่มีความยาวไม่มากนักจะนำไปปั่นเป็นเส้นด้ายเรียกว่าไหมปั่น (Spun silk)



รูปที่ 2.1 เส้นใยไหมดิบ [5]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าส่วนประกอบที่สำคัญของไหมที่มีอยู่ในรังไหมแต่ละรัง คือ Fibroin และ Sericin ดังนั้นกระบวนการผลิตต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการลอกกาวไหม การฟอกขาวไหม การย้อมหรือการตกแต่งสำเร็จไหมก็จะต้องมีความเกี่ยวข้องกับส่วนประกอบดังกล่าวนี้

2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของไหม (Chemical Structure of Silk) [5-6, 11]

2.4.1.1 ไฟโบรอิน (Fibroin)

ไฟโบรอิน (Fibroin) คือ ส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยไหมจริงๆ มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นโปรตีนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ของกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด แต่กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไฟโบรอินมี 4 ชนิด คือ ไกลซีน (Glycine) อะลานีน (Alanine) เซรีน (Serine) และไทโรซีน (Tyrosine) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์หรือเพปไทด์ (Amide or peptide bond) เกิดเป็นพอลิเอไมด์หรือพอลิเพปไทด์ กรดอะมิโนดังกล่าวจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมและอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงดู ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในไฟโบรอิน [5]

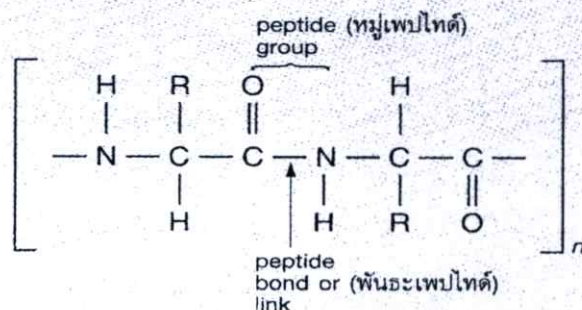
กรดอะมิโนที่สำคัญ	ปริมาณที่พบในไฟโบรอิน (%)
ไกลซีน (Glycine)	43.99
อะลานีน (Alanine)	26.54
เซรีน (Serine)	11.41
ไทโรซีน (Tyrosine)	5.35

ธาตุที่สำคัญในไฟโบรอิน ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และไฮโดรเจน (H) สำหรับซัลเฟอร์ (S) จะมีปริมาณน้อยมากขึ้นกับ โมเลกุลข้างเคียงจึงทำให้เส้นใยไหมแตกต่างจากเส้นใยขนสัตว์ซึ่งต่างก็เป็นเส้นใยโปรตีนเหมือนกัน แต่เส้นใยขนสัตว์เป็นโปรตีนชนิดเคราติน (Keratin) และมีปริมาณของซัลเฟอร์ 0.7-5% ปริมาณของธาตุต่างๆ ในไฟโบรอิน ดังตารางที่ 2.2

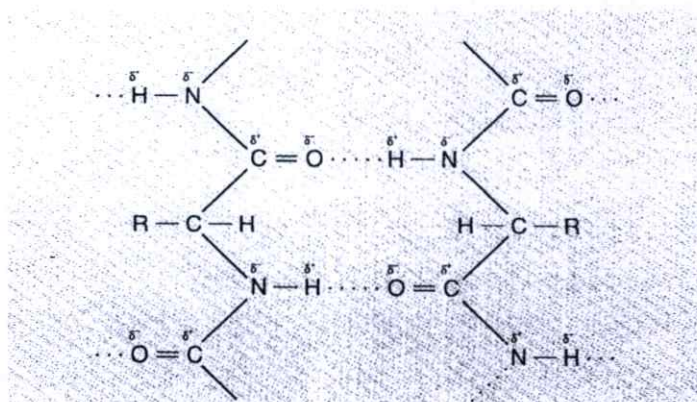
ตารางที่ 2.2 ธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนในไฟโบรอิน [5]

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ปริมาณที่พบในไฟโบรอิน (%)
คาร์บอน (C)	48.0 – 49.0
ออกซิเจน (O)	26.0 – 28.0
ไนโตรเจน (N)	17.0 – 19.0
ไฮโดรเจน (H)	6.4 – 6.5

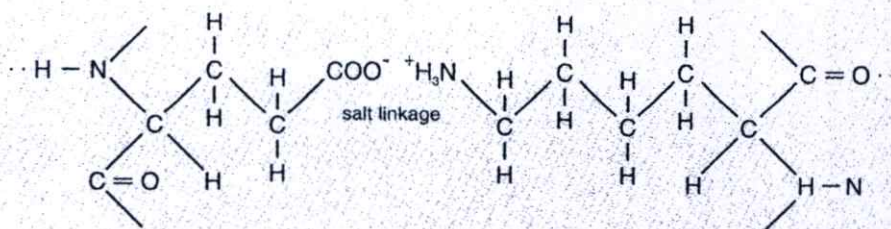
เนื่องจาก Fibroin มีโครงสร้างที่เป็นผลึกมาก มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบ มีการจัดเรียงตัวที่ดี ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงขนาดเล็ก และการที่สายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของไฟโบรอินมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีลักษณะเหยียดยาว ซักกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโน ดังนั้นจึงทำให้ Fibroin ไม่ละลายน้ำ ดังรูปที่ 2.2-2.4



รูปที่ 2.2 สายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม [5]

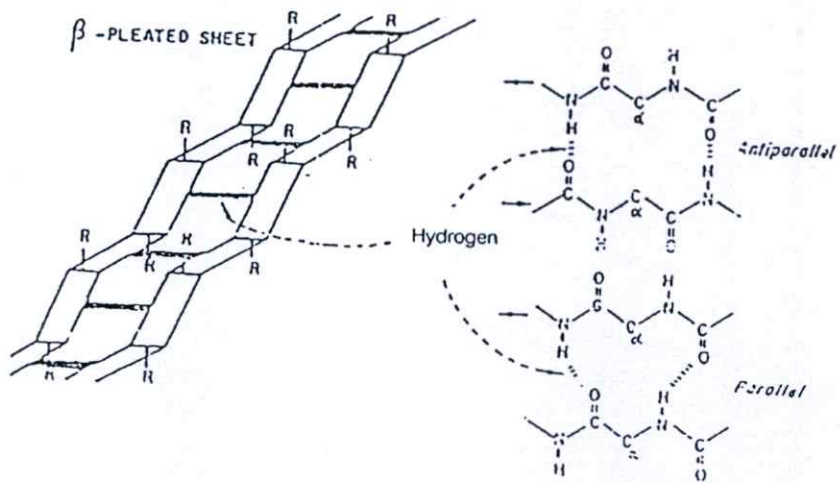


รูปที่ 2.3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโนของสายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม 2 โมเลกุล [5]



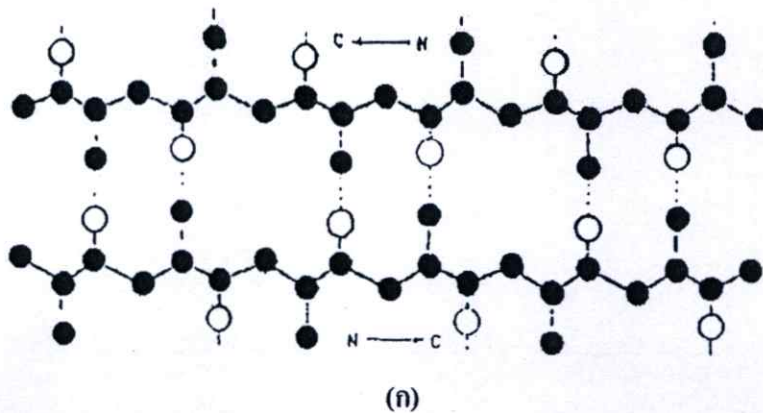
รูปที่ 2.4 การเกิดพันธะไอออนิกหรือ Salt linkage ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีนซึ่งเป็นหมู่ข้างเคียงของสายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม [5]

เนื่องจากโปรตีนของไฟโบรอินอยู่ในลักษณะที่มีการจัดเรียงตัวแบบแผ่นพับเบต้า (β -sheet) ซึ่งเกิดจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเพปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีลักษณะเหยียดยาว ไม่พับตัวกันเหมือนขนสัตว์โมเลกุลจึงเรียงตัวกันยาวและเกาะกันได้แน่นกว่า โดยยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมิโนเกิดโครงสร้างที่เป็นแผ่นพับของระนาบที่เกิดจากการขนานกันของสายพอลิเพปไทด์ มีการหักขึ้นลงเป็นแผ่นพับเหมือนรอยหยักขึ้นลงของการพับกระดาษกลายเป็นโครงสร้าง 3 มิติซ้อนกันหลายชั้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมีความเป็นผลึกมาก ส่วนพันธะไอออนิกพบได้เป็นส่วนน้อยในโครงสร้างของไหม

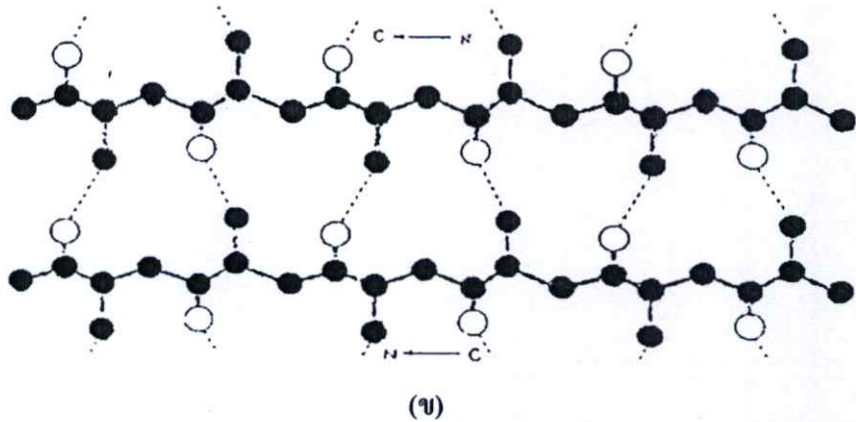


รูปที่ 2.5 โครงแบบแผ่นพับเบต้า (β -sheet) ของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไฟโบรอิน [12]

โมเลกุลไฟโบรอินนี้มีโครงสร้างแบบเบต้าที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไป C ตรงข้ามกัน เรียกว่า แอนติพาราเลล (Fully Extended Antiparallel) แสดงดังรูปที่ 2.6 (ก) ในขณะที่โมเลกุลของเส้นใยโปรตีนชนิดอื่นจะมีโครงสร้างแบบพาราเลล (Parallel) คือ สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไป C เหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 2.6 (ข)



(ก)



รูปที่ 2.6 (ก) ลักษณะโครงสร้างแอนติพาราเลลเบต้า-ชีท (Antiparallel pleated sheet structure) และ (ข) พาราเลลเบต้า-ชีท (Parallel pleated sheet structure) [12]

จากการศึกษาไฟโบรอินด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray Diffraction, XRD) พบว่ากาวไหม (เซริซิน) แสดงให้เห็นว่าเป็นบริเวณที่ไม่มีผลึกและโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ส่วนไฟโบรอินแสดงส่วนที่เป็นผลึก มีการเรียงตัวดี ซึ่งบริเวณที่เป็นผลึกของโมเลกุลไฟโบรอินได้มาจากกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงเล็กๆ เช่น ไกลซีน อะลานีน และเซรีน บริเวณที่ไม่มีผลึกมาจากกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงที่ใหญ่ เช่น ไทโรซีน

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไฟโบรอินทำได้ยาก เนื่องจากไฟโบรอินไม่ละลายในสารละลายทั่วไปแต่ละลายได้ในสารละลายบางตัวเท่านั้น เช่น คิวปริ-เอทิลีนไดเอมีน (Cupri-ethylenediamine) หรือในสารละลายเข้มข้นลิเทียมไอโอไดด์ (Lithium iodide) หรือสารละลายเข้มข้นไซโอไซยานेट (Thiocyanate) จากการใช้สารละลายเหล่านี้ร่วมกับการใช้หลักการของการตกตะกอนในเครื่องเหวี่ยงสุญญากาศ (Ultracentrifuge) คำนวณน้ำหนักโมเลกุลได้ประมาณ 84,000 แต่ถ้าคำนวณจากการอาศัยการวัดสมบัติทางความหนืด จะได้น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 55,000 หรือมีผู้ใช้การคำนวณโดยอาศัยการวิเคราะห์จากหมู่ของกรดอะมิโน (Terminal amino acid) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 80,000-100,000

2.4.1.2 เซริซิน (Sericin)

เซริซิน (Sericin) เป็นกาวไหมที่มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็น โปรตีนที่มีกรดอะมิโนชนิด เซรีน (Serine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงขนาดใหญ่ในปริมาณสูงมากอยู่ในช่วงระหว่าง 16-38% แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของ Sericin ที่ปล่อยออกมาจากหนอนไหมแต่ละพันธุ์ นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนชนิดอื่นๆ เช่น ธีโรนีน กรดกลูตามิก และกรดแอสพาทิก คิดเป็นประมาณ 60 % ของน้ำหนักกาวไหม

กาวไหมเป็นสารที่มีสีเหลืองแข็งและไม่ยืดหยุ่นตัว ป้องกันอันตรายให้กับเส้นใย (ไฟโบรอิน) และเป็นส่วนที่ปิดบังความมันเงาของไฟโบรอิน กาวไหมถือว่าเป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ

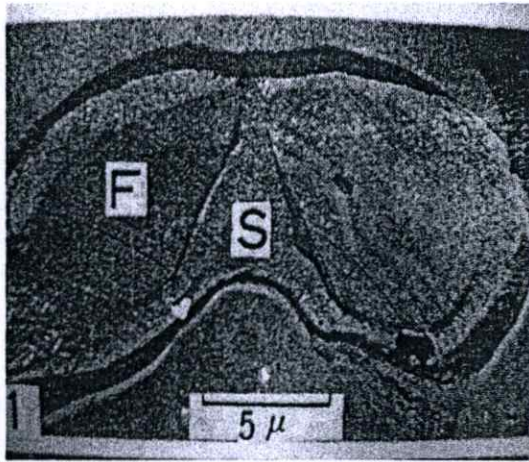
(Amorphous) จึงไม่มีความเป็นผลึก เนื่องจากสายโซ่โพลีเมอร์ของพอลิเปปไทด์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าไฟโบรอิน จึงทำให้กาวไหมละลายได้ในน้ำร้อนและยังสามารถละลายได้ในน้ำสบู่ร้อน นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้เมื่อต้มด้วยสารซักฟอกสังเคราะห์หรือกรดอินทรีย์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ที่พบในเส้นใยไหม [13]

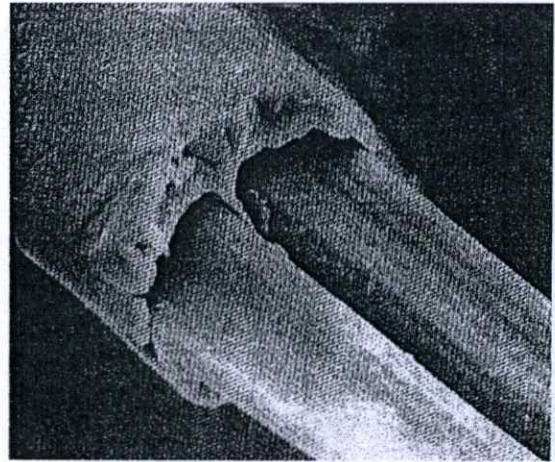
ชื่อ	โครงสร้าง	สัญลักษณ์	ลักษณะของหมู่ข้างเคียง
ไกลซีน (Glycine)	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Gly (G)	มีขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ
อะลานีน (Alanine)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Ala (A)	ไม่มีขั้ว มีสมบัติไม่ชอบน้ำ
เซรีน (Serine)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Ser (S)	มีขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ
ไทโรซีน (Tyrosine)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{OH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Tyr (Y)	มีขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Glu (Q)	หมู่ข้างเคียงมีสมบัติเป็นกรด
ไลซีน (Lysine)	$\begin{array}{c} (\text{CH}_2)_4\text{NH}_2 \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Lys (K)	หมู่ข้างเคียงมีสมบัติเป็นเบส

2.4.2 โครงสร้างทางกายภาพของไหม (Physical Structure of Silk) [5-7, 11]

ไหมดิบเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้น มีผิวที่ราบเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย เนื่องจากผิวของเส้นไหมชั้นนอกมีกาวเซรีซินซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นมากมายปกคลุมตามความยาวของเส้นใย ทำให้เส้นไหมมีความแข็งแรงกระด้าง ไม่เงามัน สีของเส้นใยไหมดิบจะมีสีเหลืองไปจนถึงสีครีม ที่ภาคตัดขวางของเส้นไหมจะเห็นเส้นใยต่อเนื่องที่เรียกว่าไฟโบรอินอยู่ 2 เส้น มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน ล้อมรอบด้วยกาวไหม แสดงดังรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) หลังจากลอกเอากาวไหม (เซรีซิน) ออกแล้วจะได้เส้นใยไฟโบรอิน 2 เส้นที่ถูแยกออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยว มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบกว่าเส้นไหมดิบที่ยังไม่ผ่านการลอกกาว แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข)

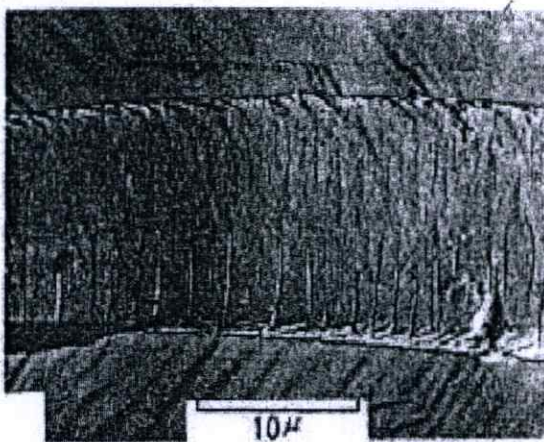


(ก)

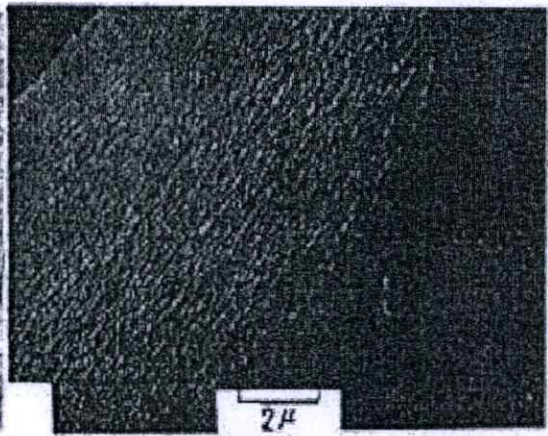


(ข)

รูปที่ 2.7 (ก) ภาคตัดขวางของเส้นไหมจากรังไหม *Bombyx mori* (F : ไฟโบรอิน (Fibroin) S : กาวเซรีซิน (Sericin)) และ (ข) ไฟโบรอินที่ถูกล้อมรอบด้วยกาวไหม [5,11]

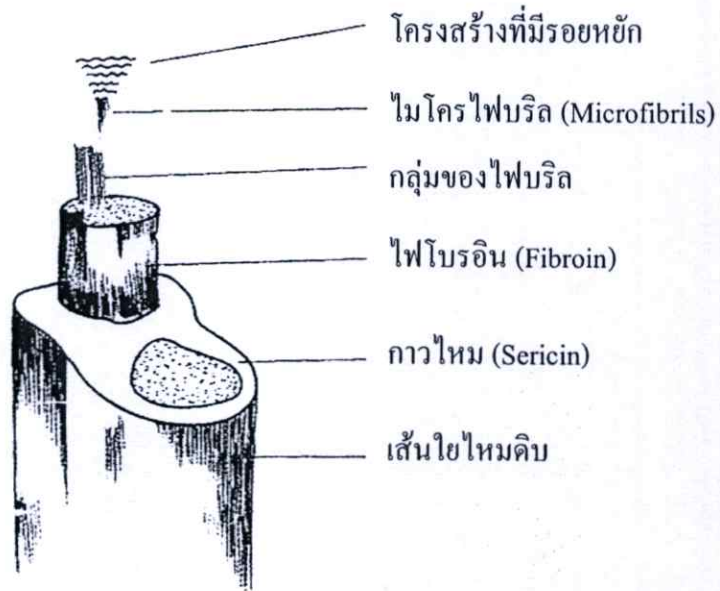


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยจากรังไหมดิบ และ (ข) ไฟโบรอินของไหมเลี้ยงที่ลอกกาวแล้ว [11]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเส้นใยไหม [7]

นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยไฟโบรอิน เกิดจากการพันเกลียวเข้าด้วยกันของไฟบริลจำนวนมาก และเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างตาข่าย ทำให้เห็นเป็นเหมือนท่อไปตามแนวยาวของเส้นใยหลังจากการลอกกาวแล้วจะได้เส้นใยยาวมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมปลายมนทั้งสองเส้นที่มีความมันเงาและมีความละเอียดสูง

2.5 สมบัติของไหม (Properties of Silk) [5-6, 8-9, 14]

ไหมเป็นเส้นใยโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานเป็นอย่างมาก ทั้งในงานสิ่งทอและอุตสาหกรรมบางประเภท ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงสมบัติต่างๆ ของไหม เพื่อที่จะทราบถึงปัญหาต่างๆ และการนำไปใช้งานที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาสมบัติของเส้นใยออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังนี้

2.5.1 สมบัติทางกายภาพของไหม (Physical Properties of Silk) [6, 8-9, 14]

1. ลักษณะภายนอก (Appearance) ไหมดิบจะเป็นลักษณะของเส้นใยคู่เกาะติดกันด้วยกาวไหมมีความมัน นุ่มนวล ผิวนอกดูเรียบ แต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย หลังจากลอกเอากาวไหมออกแล้วจะเป็นเส้นใยเดี่ยว เรียบและพื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน เป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงขนาด 1.25 เดนิเยร์ต่อเส้น

2. สี (Colour) ไหมมีสีตั้งแต่สีเหลืองถึงสีน้ำตาล โดยไหมบ้านมีสีตั้งแต่สีเหลืองจนถึงสีขาว ในขณะที่ไหมป่ามีสีเหลืองเทา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ สภาวะแวดล้อมและอาหารที่ใช้เลี้ยงดู

3. ความยาว (Length) ปกติไหมมีความยาวมากและเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาว ความยาวโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1,300-2,000 ฟุต (390-600 เมตร) และอาจพบที่ยาวถึง 4,000 ฟุต (1,200 เมตร)

4. ความมัน (Polish) ภายหลังจากที่ลอกกาวไหมออกแล้วไหมมีความมันดีมากให้ลักษณะความมันที่อ่อนนุ่ม สวยงาม

5. ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความถ่วงจำเพาะของเส้นใยอยู่ระหว่าง 1.25-1.34 แต่ยังมีกรณีที่ตัวดี ดังนั้น โครงสร้างเส้นใยจะไม่หนาแน่นเหมือนใยเซลลูโลส ทำผ้าเนื้อบางและเบาได้ดี เนื้อผ้าเหนียวและทนทาน

6. ความแข็งแรง (Strength) ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงที่สุด ด้วยผิวที่เรียบมัน ทำให้ลดปัญหาจากการขัดถู ความแข็งแรงของไหมเกิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและความเบาของไหม ซึ่งความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของใยไหม กว้างประมาณ 9-11 ไมครอน ความละเอียดของเส้นใยทำให้ผ้าไหมสามารถที่จะได้รับการออกแบบให้มีโครงสร้างที่เบาบางและคงทน ค่าความเหนียวจะอยู่ในช่วง 2.4-5.1 กรัมต่อเดนิเยร์ และเมื่อเปียกน้ำจะมีความแข็งแรงลดลงเหลือเพียง 80-85% ของความเหนียวเมื่อเส้นใยแห้ง

7. ความยืดหยุ่น (Elasticity) ไหมเป็นเส้นใยที่ยืดหยุ่นตัวได้ดีอาจแปรไปบ้างตามชนิดของพันธุ์และการเจริญเติบโต เส้นใยจากไหมสามารถถูกยืดได้ 1/7-1/5 จากความยาวเดิมก่อนขาดและสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้อย่างช้าๆ โดยสูญเสียความยืดหยุ่นไปเพียงเล็กน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถยืดได้ถึง 20% ของความยาวเดิม และจะยืดได้มากขึ้นถึง 33-35% เมื่อเปียก เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยขนสัตว์จะพบว่า สภาพยืดหยุ่นของไหมไม่ดีเท่าขนสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของไหมไม่มีพันธะมาจับเชื่อมเป็นโครงข่ายด้านข้าง ดังนั้นจึงไม่อาจดึงกลับคืนสภาพเดิมได้ทั้งหมด

8. ความอยู่ตัว (Stability) ผ้าไหมจะไม่ยืดและหดมากเมื่อซักแต่เมื่อรีดด้วยไอน้ำจะคืนกลับขนาดเดิมได้โดยง่าย

9. การคืนตัวจากแรงอัดหรือการกลับคืนตัว (Resilience) ผ้าไหมสามารถรักษารูปร่างและด้านทานต่อรอยยับได้ค่อนข้างดี มีความสามารถในการคืนกลับได้ดี ไม่เกิดการยับย่นง่ายสามารถกลับรูปเดิมได้เพียงแขนทึงไว้ระยะหนึ่ง แต่ไม่ดีและรวดเร็วเท่าใยขนสัตว์

10. การทึงตัว (Drapability) เนื่องจากไหมมีความยืดหยุ่นและการคืนตัวสูง ดังนั้นจึงมีการทึงตัวดี

11. การหดตัว (Shrinkage) ไหมหดตัวได้เมื่อได้รับความร้อน เช่น จากเตารีดที่อุณหภูมิสูงหรือจากการซัก

12. ผลของความร้อน (Effect of heat) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 140° C เส้นใยจะทนได้เป็นเวลานาน แต่ไหมจะอ่อนแอลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เมื่อได้รับความร้อนที่สูงเกินกว่า 171° C

และถ้าอุณหภูมิมากกว่า 175°C เส้นใยจะสลายตัวทันที นับได้ว่าค่อนข้างอ่อนไหวต่อความร้อนแต่ดีกว่าขนสัตว์เมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเลตนานๆ จะมีค่าความแข็งแรงและการยืดตัวลดลง

13. การนำความร้อน (Heat conductivity) สมบัตินี้คล้ายกับขนแกะ ไหมเป็นเส้นใยโปรตีนจึงไม่นำความร้อน เนื่องจากไหมป้องกันไม่ให้ความร้อนจากร่างกายผ่านออกไปได้จึงนำมาใช้เป็นเสื้อผ้าสำหรับฤดูหนาว รวมทั้งผ้าพันคอ ผ้าไหมบางๆ มักนำมาผลิตเป็นชุดชั้นในชุดนอนและเสื้อคลุม

14. การดูดซับความชื้น (Water absorbency) ที่สภาวะมาตรฐานความสามารถในการดูดซับความชื้นจะอยู่ที่ 11% ถือว่ามีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี ทำให้ไหมข้อมติดง่ายและทำการตกแต่งได้ดี ไหมต่างจากเส้นใยชนิดอื่นตรงที่สามารถดูดซึมเอาของเหลวที่ไม่บริสุทธิ์ เช่นเกลือของโลหะไว้ได้ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำลายเส้นใยทำให้เส้นใยแยกตัวและลดความทนทานลง เนื่องจากผ้าไหมเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีจึงรักษาความอบอุ่นได้นานเหมาะแก่การทำเป็นผ้าพันคอ ชุดสูท เป็นต้น

15. ความสะอาดและความสามารถในการซักได้ (Cleanliness and washability) เนื่องจากไหมไม่จับฝุ่น การทำความสะอาดจึงควรเป็นการซักแห้งโดยใช้สบู่อ่อนๆ ควรหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องซักผ้าเนื่องจากไหมอ่อนตัวเมื่อเปียก

2.5.2 สมบัติทางเคมีของไหม (Chemical properties of silk) [5-6, 8-9, 14]

1. ความทนทานต่อกรด (Resistance to acids) ไหมไม่ถูกทำลายด้วยกรดทั่วไป แต่กรดที่มีความเข้มข้นสูงสามารถทำลายไหมได้ โครงสร้างของใยไหมดูดซึมกรดได้เร็วและจะเกาะหรือจับติดอยู่แน่นและกรดอินทรีย์ไม่ทำลายไหม จึงถูกนำมาใช้ตกแต่งไหม

อย่างไรก็ตาม ไหมทนกรดได้น้อยกว่าขนสัตว์เพราะไม่มีพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นเหตุที่มีความเป็นกรดจะสามารถทำลายเส้นใยไหมได้มากกว่าเส้นใยขนสัตว์

2. ความทนทานต่อด่าง (Resistance to alkali) ไหมมีความทนต่อด่างได้ดีกว่าขนสัตว์แต่อาจถูกทำลายได้ด้วยด่างที่มีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิสูงพอ ละลายได้ใน โซดาไฟร้อนแต่จะเกิดปฏิกิริยาและจะละลายช้ากว่าขนสัตว์ ด่างอ่อน เช่น สบู่ บอแรกซ์ และแอมโมเนียไม่เป็นอันตรายต่อไหมหากไม่ทิ้งไว้นาน

สารละลายด่างทำให้เส้นไหมเกิดการพองตัวเพราะโมเลกุลของด่างจะแทรกเข้าไปทำให้โมเลกุลของเส้นไหมบางส่วนเกิดการแยกจากกัน จากโครงสร้างของโมเลกุลของเส้นไหมที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก และแรงแวนเดอร์วาลส์ เท่านั้น จึงทำให้เส้นไหมเกิดการไฮโดรไลซ์ได้ด้วยด่าง และถ้าปล่อยให้เส้นไหมอยู่ในสารละลายด่างเป็นเวลานานๆ ก็จะมีผลทำให้พันธะเพปไทด์ของเส้นไหมเกิดการไฮโดรไลซ์และเส้นไหมก็จะถูกทำลายในที่สุด ความแข็งแรงและความงามมันก็จะลดลง

4. ความทนทานต่อเหงื่อ (Resistance to perspiration) ไหมถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหงื่อ น้ำยาคับกลีน และน้ำเกลือทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหงื่อจะไปทำให้ผ้าไหมติดคราบและผ้าไหมมักถูกทำลายได้โดยเหงื่อโดยที่สีจะเปลี่ยนไป

5. ปฏิกริยาต่อสารฟอกขาว (Reaction to bleaches) ไหมมีความทนต่อสารซักฟอกคล้ายขนสัตว์ ถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ เช่น พวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรด์ผสมอยู่ แต่สารซักฟอกประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโซเดียมเปอร์บอเรตภายใต้การซักปกติจะไม่เกิดผลเสียต่อไหม แต่ควรใช้ด้วยความระมัดระวัง

6. ผลของแสง (Effect of light) ผ้าไหมไม่ทนต่อแสงแดด โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานานผ้าไหมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและความแข็งแรงลดลง และถ้าเปรียบเทียบกับเส้นใยขนสัตว์แล้ว ไหมไม่ทนต่อแสงแดดได้เท่าขนสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของไหมไม่เป็นร่างแหและไม่ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์เช่นเดียวกับขนสัตว์ นอกจากนี้ไหมป่ามีความต้านทานต่อแสงดีกว่าไหมที่ลอกกาวแล้ว (Degummed silk)

7. ความสามารถในการย้อมสีได้ (Affinity for dyes) ไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมได้ดีมาก อาจย้อมได้ด้วยสีย้อมแอซิด (Acid dye) สีย้อมเบสิก (Basic dye) หรือสีย้อมไคเรก (Direct dye) ผ้าไหมเมื่อย้อมสีจะได้สีที่เข้มกว่าขนสัตว์และสามารถย้อมได้ในอุณหภูมิต่ำกว่าด้วย

8. ความต้านทานต่อรา (Resistance to mildew) ปกติไหมไม่เกิดราได้ง่าย ยกเว้นถูกทิ้งไว้ในภาวะที่ค่อนข้างเปียกชื้นเป็นเวลานาน

9. ความต้านทานต่อแมลง (Resistance to insects) ไหมสะอาดจะไม่มีปัญหาของแมลงและรา ยกเว้นแต่ได้ผลจากสารตกค้างสำเร็จหรือสิ่งสกปรกที่ติดมา ซึ่งไหมอาจถูกทำลายได้ด้วยตัวอ่อนของแมลง

2.6 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมโดยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment of Silks) [5, 8, 11, 15-16]

ไหมดิบที่ได้จากรังไหม ไม่ได้มีความสวยงาม เงามัน และนุ่มนวล ตามธรรมชาติเนื่องจากยังคงมีกาวไหมเคลือบอยู่ ทำให้เส้นไหมมีความแข็งกระด้าง ไม่เงามัน ดังนั้นจึงควรที่จะต้องมีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยให้ดีขึ้น เพื่อให้ไหมมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานสิ่งทอ โดยการนำเส้นไหมนั้นมาผ่านกระบวนการต่างๆ หลายขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมไหมก่อนการย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ เช่น การลอกกาวไหม และการฟอกขาวไหม เป็นต้น ส่วนการปรับปรุงไหมเพื่อเพิ่มสมบัติตามต้องการ เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติในการสัมผัส และการรับสีย้อม มักนิยมนำไปตกแต่งสำเร็จ โดยการต่อกิ่งกับไวนิลมอนอเมอร์ ส่วนการนำไหมไปย้อมด้วยสีย้อมก็จะทำให้มีความสวยงามเพิ่มขึ้น

ดังนั้นก่อนที่จะปรับปรุงเส้นไหมเพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ โดยการตกแต่งสำเร็งนั้นจึงต้องมีการทำความสะอาด (Scouring) เพื่อเอาขาวไหม และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากเส้นใยซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมเส้นใยก่อนการตกแต่งสำเร็งในเส้นใยไหม การทำความสะอาดเพื่อลอกเอาขาวไหมและสิ่งเจือปนออกนั้น เรียกว่า การลอกขาว (Degumming)

2.6.1 การลอกขาวไหม (Silk Degumming หรือ Boiling-off) [5, 11, 15]

การลอกขาวไหมเป็นกระบวนการแรกที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อกำจัดขาวไหม (Sericin) นอกจากนี้ยังเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่อาจมีอยู่ในเส้นไหม เช่น สารหล่อลื่น หรือสารนุ่มที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการผลิตเป็นเส้นด้าย การทอหรือถักผ้าหรือกำจัดฝุ่นละออง สิ่งสกปรก ขี้ผึ้ง คาร์โบไฮเดรต สารอนินทรีย์ น้ำมันหรือสีที่อาจเป็อนติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตได้ ทำให้ไหมเกิดความเงาหม่น และนุ่มนวล มีการดูดซึมน้ำที่ดีขึ้น โดยความเป็นจริงแล้วการลอกขาวไหม หรือ Silk degumming ก็คือ การกำจัดสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในเส้นใยหรือที่เราจำกักันว่า Scouring นั้นเอง แต่เรามักใช้คำว่า Scouring กับเส้นใยอื่นที่ไม่ใช่ไหม

หลักการลอกขาวไหม คือ การไฮโดรไลซ์ขาวไหมหรือทำลายพันธะเพปไทด์ของขาวไหมให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโนและโพลิโกเมอร์ของกรดอะมิโนการไฮโดรไลซ์ขาวไหมทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กรด ค่าง เอนไซม์ หรือแม้กระทั่งการใช้ น้ำที่อุณหภูมิสูงภายใต้ความดัน สบู่ก็เป็นสารที่นำมาใช้ในการลอกขาวไหมได้

ปริมาณของขาวไหมที่ถูกกำจัดออกไปไม่เท่ากันภายหลังการลอกขาวไหมนั้นจะส่งผลให้เกิดความหลากหลายของเส้นไหม เช่น

“Ecreu silk” เป็นเส้นไหมที่ขาวไหมแทบจะไม่ถูกกำจัดออกไป น้ำหนักไหมจะสูญหายได้มากที่สุดก็ประมาณ 4% เท่านั้น เนื่องจากสิ่งที่หลุดลอกออกไปจะเป็นเพียง Grease ขี้ผึ้งและสารเรซินต่างๆ เท่านั้น เส้นไหมชนิดนี้จึงยังคงแข็งกระด้างและไม่เงาหม่น เส้นไหมชนิดนี้จึงมักใช้สำหรับทำเส้นด้ายยืน ซึ่งไม่จำเป็นต้องนำไปปลงแป้งก่อนทอเป็นผืนผ้าเหมือนผ้าฝ้าย

“Half-boiled silk” เป็นเส้นไหมที่มีการลอกขาวไหมออกไปเพียงบางส่วนเท่านั้น น้ำหนักไหมจะสูญหายไปประมาณ 6-12% ของน้ำหนักไหมก่อนการลอกขาว การใช้ Tartar emetic 3-4% จะทำให้ขาวไหมอ่อนตัวลง เส้นไหมชนิดนี้จึงมีความนุ่มขึ้นแต่ก็ยังคงมีความด้านไม่เงาหม่น

“Cuite silk” เป็นเส้นไหมที่มีการกำจัดขาวไหมออกไปได้อย่างสมบูรณ์น้ำหนักไหมจะสูญหายไปสูงถึงประมาณ 18-30% เส้นไหมชนิดนี้จึงมีสัมผัสที่อ่อนนุ่มและมีความเงาหม่นสูงประสิทธิภาพของกระบวนการลอกขาวไหมสามารถตรวจสอบได้ด้วยการใช้ Pauly reagent นอกจากนี้ระดับของการลอกขาวไหมก็สามารถตรวจสอบได้โดยนำเส้นไหมที่ผ่านการลอกขาวแล้วไปย้อมด้วยสี C.I. Direct Blue 22 โดยที่สีย้อมดังกล่าวจะย้อมติดส่วนที่เป็นขาวไหมเท่านั้น แต่จะไม่ย้อมติดส่วนที่เป็นเส้นใยไฟโบรอิน

การลอกกาวยไหมมีหลายวิธีแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ไหม รูปแบบของไหมที่มีลักษณะเป็น เช็ดด้วย (Hank) หรือเป็นผ้าผืน (Habric) นั่นคือการเลือกวิธีลอกกาวยไหมที่เหมาะสมที่สุด จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะของไหมว่าเป็นเส้นด้ายปกติเส้นด้ายตีเกลียว หรือ โครงสร้างและความหนาแน่นของผ้าไหมทอ

ถึงแม้ว่าไหมป่าพันธุ์ Tussah จะมีกาวยไหมน้อยกว่าไหมเลี้ยงพันธุ์ *Bombyx mori* หรือ Mulberry silk ดังกล่าวข้างต้นก็ตาม การลอกกาวยไหมป่าพันธุ์ Tussah จะยากกว่าอาจเนื่องจากไหมป่ามีเกลือ แคลเซียมอยู่ปริมาณสูง การที่น้ำหนักของไหมสูญเสียไปภายหลังการลอกกาวยไหมได้ส่งผลให้ ความแข็งแรงของเส้นไหมลดลงถึงประมาณ 20% เพื่อเป็นการเพิ่มน้ำหนักและปริมาตรของไหมที่ สูญเสียไปเราจึงมักจะต้องทำการเพิ่มน้ำหนักไหม (Silk weight-ing) ภายหลังการลอกกาวยไหม

วิธีที่ใช้ลอกกาวยไหมอาจเลือกใช้ได้ทั้งวิธีทางกายภาพหรือทางเคมี แต่ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดก็ตาม เราจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อไม่ให้เส้นไหมเกิดความเสียหาย และต้องทำให้เกิดความ สม่าเสมอเพราะหากลอกกาวยไม่สม่าเสมอแล้วจะมีผลทำให้เส้นด้ายหรือผ้าที่ข้อมได้ไม่สม่าเสมอ เป็นจุดๆ วิธีลอกกาวยไหม ได้แก่

1. การลอกกาวยไหมด้วยน้ำภายใต้ความดันสูง (High pressure water degumming)

ไหมเลี้ยงพันธุ์ต่างๆสามารถใช้น้ำที่อุณหภูมิ 120° C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทำซ้ำแบบเดียวกัน นี้ 3-4 ครั้ง การต้มไหมในน้ำเป็นเวลานานๆ จะค่อยๆ ทำให้เส้นไหมเกิดการเสื่อมสลายและ ไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆ ในกรณีนี้หากใช้อุปกรณ์ความดันสูง จะทำให้เส้นไหมเสื่อมสลายหรือ ถูกทำลาย (Degrade) น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามอาจมีการตัดแปร โมเลกุลของโปรตีนเกิดขึ้น

2. การลอกกาวยไหมด้วยด่าง (Alkaline degumming)

ในการลอกกาวยไหมด้วยสารละลายด่างนั้นต้องคำนึงถึง pH และอุณหภูมิ โดยหากลอกกาวยไหม ด้วยสารละลายด่างที่ pH มากกว่า 9 กาวยไหมจะถูกกำจัดออกได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์หลังจาก ทำการลอกกาวยได้เพียง 30 นาทีเท่านั้น อุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 90° C เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นไหม เปื่อย และ pH ของอ่างลอกกาวยก็จะมีผลต่อระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ของเส้นใย ไฟโบรอิน ด้วย

อย่างไรก็ตามสารละลายด่างที่ใช้ในการลอกกาวยไหมไม่ควรใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic soda, NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Caustic potash, KOH) เพราะจะทำลายเส้นไหมได้ ด่างที่ใช้ในการลอกกาวยไหมจึงมักเป็น โซเดียมคาร์บอเนต โซดาแอชหรือที่เป็นด่างอ่อนกว่า

3. การลอกกาวยไหมด้วยกรด (Acid degumming)

ในการลอกกาวยไหมด้วยสารละลายกรดที่ pH น้อยกว่า 2.5 หรือระหว่าง 1.5-2.0 กาวยไหมจะถูก กำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ กรดแร่ (Mineral acids) ได้แก่ กรดซัลฟิวริกและกรด ไฮโดรคลอริกจะมีประสิทธิภาพในการลอกกาวยไหมมากกว่ากรดอินทรีย์ (Organic acids) pH ของ อ่าง ลอกกาวยก็จะมีผลต่อระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ของเส้นใยไฟโบรอินด้วย

4. การลอกกาวยไหมด้วยสบู่

สบู่ได้ถูกนำมาใช้ลอกกาวยไหมกว่า 200 ปีแล้ว และปัจจุบันเราก็ยังพบว่ายังมีหลายโรงงานหรือหลายหมู่บ้านที่ยังคงใช้สบู่สำหรับลอกกาวยไหม สำหรับบ้านเราเมื่อพูดถึงสบู่ที่ใช้ลอกกาวยไหมเรามักจะนึกถึง “สบู่ซันไลต์” ที่ปัจจุบันจะทำเป็นเกล็ดหรือผงเพื่อให้ง่ายต่อการผลิต

การลอกกาวยไหมด้วยสบู่ต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยดัดสารละลายสบู่และความคุม pH ให้เป็นด่างน้อยๆเท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นไหม (Fibroin) ถูกทำลาย วิธีนี้จะดัดสารละลายสบู่ที่อุณหภูมิ 90-95° C เป็นเวลา 1.5-2 ชั่วโมง น้ำที่ใช้ก็ควรเป็นน้ำอ่อนหรืออาจมีการเติมสาร Sequestering เพื่อลดความกระด้างของน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้สบู่ตกค้างและเปื้อนติดอยู่ในเส้นไหม

สำหรับไหมเลี้ยงพันธุ์สีขาวและมีความละเอียดอ่อนนั้นอาจแบ่งการลอกกาวยไหมออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่สองจะใช้สารละลายสบู่เพียงครั้งหนึ่งของขั้นตอนแรกเท่านั้นทั้ง 2 ขั้นตอนจะใช้เวลาประมาณ 40-45 นาทีเท่าๆ กัน ในขณะที่ไหมป่าพันธุ์ Tussah มักจะต้องมาดัดในน้ำเดือดก่อน จากนั้นจึงค่อยนำไปลอกกาวยไหมด้วยด่างแก้อ่างลอกกาวย

หากทำการลอกกาวยไหมแบบชุดหรือหม้อ (Batch) อาจใช้สารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตผสมกับสบู่เพื่อให้สามารถกำจัดกาวยไหมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. การลอกกาวยไหมด้วยโซดา

นำไหมมาดัดด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 10-12% o.w.f. หรือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 12-15% o.w.f. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90° C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำอุ่นและน้ำธรรมดาหลายครั้ง มีวิธีการลอกกาวย 2 ครั้ง โดยแบ่งครึ่งสารละลายลอกกาวยเพื่อป้องกันการลอกกาวยไม่สม่ำเสมอ วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องขจัดโคลสบู่และเวลาในการลอกกาวยสั้นค่าใช้จ่ายต่ำกว่า แต่อัลคาไลมีความรุนแรงมากจึงทำให้การลอกกาวยไหมมากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายแก่เส้นใยและบางครั้งสูญเสียความโค้งงอ ความพองตัวและคุณภาพไหม

6. การลอกกาวยไหมด้วยสบู่ – โซดา

นำเส้นไหมมาดัดด้วยสารละลายสบู่ 8-15% o.w.f. และ โซเดียมคาร์บอเนต 5-8% o.w.f. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90° C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง แล้วนำมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 % ที่อุณหภูมิ 40-50° C และน้ำธรรมดาหลายๆ ครั้ง วิธีนี้ช่วยลอกกาวยในเส้นไหมได้อย่างพอเพียงและให้ความขาวดีกว่าวิธีการลอกกาวยด้วยโซดา สามารถใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซึ่งมีปฏิกิริยาเป็นด่างอ่อนกว่า แทนการใช้โซเดียมคาร์บอเนต

7. การดัดด้วยสารซักฟอกสังเคราะห์ (Synthetic detergent degumming)

สารซักฟอกสังเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้ลอกกาวยไหมแทนการใช้สบู่มากขึ้น เนื่องจากสบู่มีข้อด้อยหลายประการ เช่น มีราคาแพง ต้องใช้ปริมาณสูง และเวลาลอกกาวยนานถึง 1-2 ชั่วโมง และอีกเหตุผลหนึ่ง คือ หากลอกกาวยไหมด้วยสบู่โดยใช้เครื่องจักรแบบต่อเนื่อง (Continuous machine) สบู่จะไม่สามารถขจัดหรือลดความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฮโดรไลซ์กาวยไหม (Sericin

hydrolysis products) ที่สะสมอยู่ในอ่างลอกกาวได้เหมือนสารซักฟอกสังเคราะห์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกาวไหมไม่ดี และการลอกกาวไหมด้วยสารซักฟอกสังเคราะห์แทนการใช้สบู่จะลดการขึ้นขนของไหม (Silk lice, pilling) ด้วย

ในตลาดปัจจุบันมีสารซักฟอกสังเคราะห์สำหรับลอกกาวไหมมากมาย แต่การเลือกสารซักฟอกสังเคราะห์ที่เหมาะสมก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะถ้าเราต้องการให้ไหมที่ผ่านการลอกกาวมีสัมผัสที่นุ่มนวลเหมือนกับที่ได้จากการใช้สบู่

การใช้สารซักฟอกสังเคราะห์ที่ไม่มีประจุ เช่น สารประกอบ Nonyl phenol ethoxylate ลอกกาวไหมโดยควบคุม pH อยู่ในช่วง 11.2-11.5 อุณหภูมิ 95° C เป็นเวลาเพียง 40 นาที พบว่าสามารถกำจัดไหมออกได้ในขณะที่เส้นไหมก็ยังคงมีความแข็งแรง

8. การลอกกาวไหมด้วยเอนไซม์ (Enzymatic degumming)

เทคโนโลยีชีวภาพที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทำให้เราสามารถผลิตเอนไซม์ที่หลากหลายประเภทและสมบัติที่ถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งาน ประกอบกับเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะต่อเส้นใยหรือ Substrate ทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อเส้นใย ภาวะที่ใช้ก็ไม่รุนแรงสามารถนำมาใช้ทดแทนสารเคมี ปริมาณที่ใช้ไม่สูงมากนัก สามารถประหยัดน้ำและพลังงานที่สำคัญสามารถตอบสนองต่อความต้องการในปัจจุบันที่ต้องการกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงทำให้เอนไซม์เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีก่นำมาศึกษาหรือใช้ในกระบวนการสิ่งทอ

การลอกกาวไหมก็เป็นอีกกระบวนการหนึ่งทางสิ่งทอเช่นกันที่มีความพยายามนำเอนไซม์มาใช้เพื่อไม่ทำให้ความแข็งแรงของเส้นไหมลดลง โดยเอนไซม์ที่จะนำมาใช้ในกระบวนการนี้จะต้องสามารถไฮโดรไลซ์ Sericin ซึ่งเป็นกาวไหมที่มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็น โปรตีนเรียกเฉพาะว่า Proteolytic enzymes ซึ่งก็คือเอนไซม์โปรติเอส (Protease) ที่ย่อยสลายโปรตีนได้นั่นเอง เอนไซม์ประเภทนี้จะเกาะติดที่พันธะระหว่างเพปไทด์และเอไมด์ แล้วย่อยสลายให้กลายเป็นสายโซ่ของพอลิเพปไทด์สั้นๆ และกรดอะมิโน แบ่งเป็น 4 กลุ่ม หลักดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กลุ่มของเอนไซม์โปรติเอสและตัวอย่างเอนไซม์ [15]

Protease group (Class)	Examples	Optimum pH*	Optimum temperature** (° C)
Alkaline proteases (Serine proteases)	Trypsin, Chymotrypsin, Thrombin, Proteinase K	10	60
Neutral proteases (Metall oproteases)	Zinc protease, Thermolysin	7-8	80
Acidic proteases (Aspartic proteases)	Pepsin, Rennin (Chymosin), Microbial aspartic Proteases	2.5-4.5	50
Thiol proteases (Cysteine proteases)	Papain, Ficin, Bromelain	5-7	65

หมายเหตุ : * pH ที่ให้ผลสูงสุดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเอนไซม์แต่ละตัว ควรสอบถามข้อมูลที่ชัดเจนจากผู้ผลิตและผู้ขาย

: ** อุณหภูมิที่ให้ผลสูงสุดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเอนไซม์แต่ละตัว ควรสอบถามข้อมูลที่ชัดเจนจากผู้ผลิตและผู้ขาย

ความสามารถในการลอกกาไหมของ Proteolytic enzyme เหล่านี้ขึ้นอยู่กับ pH ของอ่างลอกกาไหม และเอนไซม์แตกต่างกันก็จะมีแอกติวิตีที่ได้ผลดีที่สุด (Optimum activity) แตกต่างกันไปสำหรับ pH ที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการลอกกาไหมด้วยเอนไซม์โปรติเอสกลุ่ม Alkaline protease และ Thiol proteases

การลอกกาไหมด้วยเอนไซม์นั้นมักจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกเรียกว่า “Pre-degumming” เป็นการนำผ้ามาต้มในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอส (Soda ash) 1 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 95° C เป็นเวลา 20 นาที อัตราส่วนของวัสดุค่อน้ำ (LR) 1:30 สำหรับขั้นตอนที่สองจะเป็นการลอกกาไหมในสารละลายเอนไซม์โปรติเอส 0.06-0.1 กรัมต่อลิตร สารซักฟอกที่ไม่มีประจุ 1 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 55-60° C เป็นเวลา 30 นาที เราต้องยอมรับว่าเอนไซม์จะไม่สามารถลอกกาไหมออกได้หมด แต่หากเพิ่มขั้นตอนที่สามโดยนำผ้าที่ผ่านการลอกกาไหมด้วยเอนไซม์มาทำปฏิกิริยาในอ่างลอกกาไหมที่มีสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอสหรือสบู่ก็จะทำให้กาไหมหรือ Sericin ที่เหลืออยู่ถูกกำจัดออกไปได้

การลอกกาไหมในรูปของเส้นไหมด้วยเอนไซม์โปรติเอสพบว่า Alkaline protease เป็นเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพในการลอกกาไหมได้ดีกว่า Neutral และ Acidic proteases โดยสามารถ

กำจัดกาวยาหมออกได้อย่างสมบูรณ์ และสม่ำเสมอ อีกทั้งเส้นไหมยังคงมีความแข็งแรง พื้นผิวเรียบ นุ่มนวลและมีความเงามัน หากนำเอนไซม์โปรติเอสผสมกับเอนไซม์ไลเปสเพื่อลอกกาวยาหมพบว่า ทั้งขี้ผึ้งและกาวยาหมที่มีอยู่ในเส้นไหมจะถูกกำจัดออก แล้วยังมีผลดีที่ทำให้เส้นไหมมีความสามารถในการเปียก (Wettability) มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์ลอกกาวยาหมในรูปของผ้าไหมยังเพิ่มความขาวให้แก่ผ้าไหมด้วย แต่ผ้าก็มีความแข็งกระด้างไม่นุ่มเหมือนที่ใช้สบู่และด่าง อาจเนื่องมาจากยังมีกาวยาหมตกค้างอยู่บริเวณที่เส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืนขัดกัน ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักไหมที่สูญหายไปภายหลังการลอกกาวยาหมด้วยเอนไซม์โปรติเอสกลุ่ม Alkaline protease และ Thiol proteases

เส้นไหมที่ผ่านการลอกกาวยาหมด้วยเอนไซม์นอกจากจะมีความเรียบมากกว่าใช้สบู่แล้วยังปรับปรุงให้เส้นไหมมีความสามารถในการดูดซับสีที่ฟอกขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบกระบวนการลอกกาวยาหมด้วยเอนไซม์ Alkaline protease และ Thiol proteases [15]

ภาวะที่ใช้ในการลอกกาวยาหม	Alkaline protease	Thiol proteases
เอนไซม์	2.5% o.w.f. Alcalase 2.5L DX	6.7 กรัมต่อลิตร Papain
Auxiliary agents	1 กรัมต่อลิตร Wetting agent	1% Sodium bisulphide
Liquor ratio	1:20	1:7
pH	8.5	6-7
เวลา (นาที)	30-60	30-60

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบน้ำหนักไหมที่สูญหายไปภายหลังการลอกกาวยาหมด้วย Alkaline protease และ Thiol proteases [15]

วิธีลอกกาวยาหม	เวลา	น้ำหนักไหมที่สูญหายไป (%)
Marseille soap (LR = 1:20, pH 9.5-10, อุณหภูมิ 80-85° C)	150 นาที (2 ชั้นตอน)	24.80
Alkaline protease (Alcalase 2.5L DX)	30 นาที	8.67
	60 นาที	33.19
Thiol proteases (papain)	30 นาที	12.71
	60 นาที	14.53

9. การลอกกาวไหมด้วยการทำให้เกิดฟอง (Foam degumming)

การลอกกาวไหมด้วยการเทคนิคการทำให้เกิดฟองเป็นการนำเจ็ดไหมหรือใจไหมแขวนอยู่บนราวไม้ในอ่างที่มีสารละลายสบู่ความเข้มข้น 40% ที่ต้มให้เดือดจนมีฟองผุดขึ้นมากมาย ทำการหมุนเจ็ดไหมเป็นครั้งคราว ฟองสบู่ที่เกิดขึ้นจะละลายและกำจัดกาวไหมออกไป อย่างไรก็ตามกรรมวิธีนี้ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายนัก

10. การลอกกาวไหมออกเพียงบางส่วน

ในบางครั้งเราอาจต้องการลอกกาวไหมออกเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยเราต้องนำไหมไปอุ่นในอ่างสารละลายสบู่ที่เป็นด่างเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ 30-40° C เพื่อกำจัด Grease จากนั้นจึงนำไปต้มในอ่างที่มีสารละลายของกรดหรือเกลือของกรด ในสารละลายที่เป็นกรดกาวไหมจะถูกกำจัดออกไม่มากเหมือนในสารละลายที่เป็นด่างหรือเป็นกลาง อย่างไรก็ตามการลอกกาวไหมด้วยกรดมีผลดีต่อความแข็งแรงและสัมผัสที่อ่อนนุ่มของเส้นไหมที่ได้ ส่วนประกอบที่ใช้ลอกกาวไหมออกบางส่วน ได้แก่ กรดซัลฟิวริกและแมกนีเซียมซัลเฟต กรดซัลฟิวริกและสบู่กรดซัลฟิวริก และทาร์ทาร์ สารละลายสบู่ความเข้มข้น 4% และสารละลายโซเดียมไบซัลไฟด์ (NaHSO_3) อุณหภูมิที่จุดเดือดเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยภาวะที่ใช้จะขึ้นกับธรรมชาติของไหมแต่ละพันธุ์ เส้นไหมที่ได้จากกรรมวิธีนี้เรียกว่า "Halt-boiled silk"

2.6.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Finishing) [11, 16-18]

เส้นไหมที่ผ่านการลอกกาวแล้วจะมีความสวยงาม มันเงาและนุ่มนวลมากขึ้นแต่เมื่อกำจัดกาวไหมออกแล้วทำให้น้ำหนักลดลง สมบัติของเส้นไหมที่ได้มีค่าลดลง ประกอบกับเส้นไหมมีข้อด้อยต่างๆ เช่น เมื่อโดนกับแสงแดดเป็นเวลานานๆ เส้นไหมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและความแข็งแรงลดลง มีความสามารถในการคืนตัวจากรอยยับที่ไม่ดีตลอดจนมีความไวต่อความร้อนและสารเคมี สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการใช้วิธีการทางเคมีโดยการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งการตกแต่งทางเคมีของไหมมีหลายอย่าง เช่น การเพิ่มน้ำหนักของไหมด้วยเกลือของโลหะ (Metallic salt) เช่น ดินบุกคอลลอยด์ ทำให้มีผิวสัมผัสดีกว่าเดิม มีน้ำหนักและมีการทิ้งตัวที่ดีขึ้น การตกแต่งด้วยเรซินเพื่อให้เกิดความคงทนต่อการยับ ทนต่อการหดตัว ให้ความนุ่ม มีความคงทนต่อแสงแดดและคงทนต่อการซักสี สารเคมีที่นำมาใช้ในการตกแต่งไหมมีหลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ สารประกอบพวกที่เป็นมอโนเมอร์และพอลิเมอร์ เช่น ยูเรีย และเมลามีน ฟอรั่มัลดีไฮด์ เป็นต้น พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต เช่น อีพอกซี ซิลิโคน ฟีนอลิก อะคริลามิด คาร์บอนเนตและพอลิยูรีเทน ซึ่งให้โครงสร้างเป็นร่างแหและพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิไวนิลเรซิน พอลิอะคริลเรซิน พอลิอะมีดเรซิน และพอลิโอดิฟีนส์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง และเมื่อเร็วๆ นี้มีวิธีการทำให้เกิดพอลิเมอร์แบบตอกิ่ง (Graft polymerization) โดยใช้สารประกอบไวนิล อะคริลิก สไตรีน ซึ่งไวนิลมอนอเมอร์ที่นิยมใช้มี

มากมายหลายชนิด ได้แก่ เมทิลเมทาคริเลต เมทาคริลาไมด์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต อีพอกซีเรซินและไซเลน เป็นต้น โดยจะทำให้ได้เส้นใยไหมที่มีสมบัติแตกต่างกันไป

การตกแต่งสำเร็จใหม่ด้วยวิธีการต่อกิ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ 2 กลไก คือ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) และการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft copolymerization)

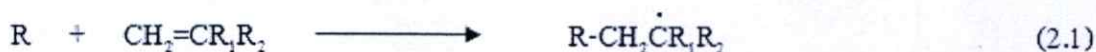
2.6.2.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ [17-20]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระนี้จะเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเริ่มจากการใช้ตัวริเริ่มที่สามารถแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะไพ (π-bond) บนไวนิลมอนอเมอร์และเกิดการสลายตัวไปเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ที่สามารถเข้าร่วมกับมอนอเมอร์ตัวอื่นจนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวออกมา ตัวริเริ่มที่นำมาใช้ต้องเป็นสารเคมีที่เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะต่างๆ ได้แก่ ความร้อน รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า และการกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมีสามารถให้อนุมูลอิสระที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอนุมูลอิสระซึ่งเกิดจากมอนอเมอร์และอนุมูลอิสระดังกล่าวต้องมีความว่องไวเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยากับไวนิลมอนอเมอร์เพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ขึ้นมา

กระบวนการสังเคราะห์แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน

1. ขั้นริเริ่ม (Initiator) เป็นขั้นที่เกิดบริเวณว่องไว (Active center) ทำหน้าที่ริเริ่มโซ่
2. ขั้นขยายสายโซ่ (Propagation) เกี่ยวข้องกับการขยายความยาวของโซ่พอลิเมอร์โดยการเพิ่มมอนอเมอร์เข้าไปในโซ่
3. ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Termination) เป็นการทำให้โซ่เป็นกลาง

อนุมูลอิสระ คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวเหลืออยู่ในโครงสร้างอนุมูลนี้สามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โอลิฟินเพื่อเริ่มต้นโซ่พอลิเมอร์ที่ยังคงมีปลายโซ่ว่องไว แม้ว่าโซ่จะขยายยาวขึ้น และเนื่องจากอนุมูลอิสระมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าไม่ค่อยเลือกที่จะทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปจึงมีประโยชน์มากในการใช้เป็นตัวริเริ่มเพราะหมู่อะตอมที่แทนที่ตรงพันธะคู่สามารถช่วยให้เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นเสถียรพอสำหรับขั้นขยายโซ่ได้



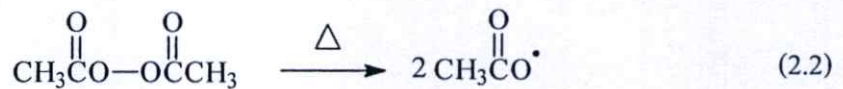
พอลิเมอร์เชชันแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระเป็นปฏิกิริยาถูกโซ่ที่มีกระบวนการหลักอยู่ 3 ขั้น คือ ขั้นริเริ่ม เริ่มต้นสร้างสายโซ่พอลิเมอร์โดยตัวริเริ่มที่มีอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของมอนอเมอร์ ขั้นขยายสายโซ่เริ่มจากมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยากับปลายโซ่ด้านที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่และเกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวที่ตำแหน่งใหม่ขึ้นอีก ปฏิกิริยาดำเนินเช่นนี้อย่างรวดเร็วจึงได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักมoleกุลสูงในเวลาอันสั้น และขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาเริ่มจากอิเล็กตรอนเดี่ยวที่ปลายโซ่ 2 โมเลกุลมาทำปฏิกิริยากันเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่เป็นกลาง หากต้องการหยุดปฏิกิริยาเพื่อควบคุม

น้ำหนักโมเลกุลสามารถทำได้โดยการเติมตัวยับยั้งเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาที่เกิดจากการเติมตัวยับยั้ง ปฏิกิริยาล่าช้าไอโซไซท์ให้โมเลกุลอื่น เช่น ล่าช้าไอโซให้ตัวทำละลายและการเกิดโซ่กิ่ง ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับปฏิกิริยาชนิดนี้ คือ มอนอเมอร์ ตัวริเริ่ม ตัวทำละลาย และตัวยับยั้ง

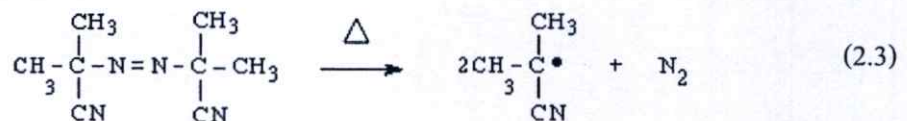
การสลายตัวของตัวริเริ่มด้วยพลังงานกระตุ้นต่างๆ

(ก) การสลายตัวด้วยความร้อน

สารเคมีบางชนิดสลายตัวให้อนุมูลอิสระเมื่อได้รับความร้อน และถ้าหากอุณหภูมิของการสลายตัวนั้นตรงกับอุณหภูมิในการเกิดพอลิเมอร์ สารเคมีนั้นใช้เป็นตัวริเริ่มสำหรับไวนิลมอนอเมอร์ได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดทั้งในเชิงการค้าและในการศึกษากลไกของปฏิกิริยาพอลิเมโรเรชันเชิงทฤษฎี โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สำคัญมักมีโครงสร้างเป็นสารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ เอโซ และเปอร์ซัลเฟต ตัวริเริ่มส่วนใหญ่มักมีพลังงานพันธะอยู่ในช่วง 25-40 กิโลแคลอรีต่อโมล เพราะสารที่มีพลังงานพันธะสูงกว่านี้จะสลายตัวช้าเกินไป ถ้าต่ำกว่านี้ก็สลายตัวเร็วเกินไป จึงไม่เหมาะที่จะเป็นตัวริเริ่ม ดังนั้นประเภทสารที่เหมาะสมจึงจำกัดเหลือเพียงสารที่มีพันธะ O-O S-S และ N-O ในโมเลกุลของสารเท่านั้น สารที่นิยมใช้เป็นตัวริเริ่มมากที่สุด ได้แก่ สารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่มีพันธะ O-O แสดงการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระดังสมการที่ 2.2



นอกจากนี้ยังมีสารอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้เป็นตัวริเริ่ม คือ สารประเภทเอโซ และที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ 2,2-azobisisobutyronitrile ซึ่งเรียกย่อว่า AIBN โครงสร้างและการสลายตัวของสารนี้แสดงดังสมการที่ 2.3



สารเคมีจะทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มที่ดีหรือไม่ดีนั้นขึ้นกับอัตราเร็วของการสลายตัวที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาสารเคมีใดๆ 1 โมเลกุลเมื่อเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction) จะให้อนุมูลอิสระ 2 อนุโมล เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาโซ่ ปกติการเพิ่มอุณหภูมิหรือการเพิ่มความเข้มข้นของตัวริเริ่มส่งผลให้อัตราการเกิดพอลิเมอร์เร็วขึ้น ในทางตรงข้ามถ้าเพิ่มอัตราในขั้นเริ่มต้นโซ่ จะทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวโซ่พอลิเมอร์ลดลงแต่จำนวนสายโซ่มากขึ้น ดังนั้นการเลือกตัวริเริ่มและการเลือกอุณหภูมิสำหรับขั้นเริ่มต้นต้องอยู่ระหว่างความต้องการที่จะให้เกิดพอลิเมอร์เร็วและพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พอลิเมโรเรชันด้วยอนุมูลอิสระส่วนมากทำ

ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 °C เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้อยู่ในช่วงการสลายตัวของสารประเภทเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เอโซและโลหะอัลคิล (Metal alkyls) ที่อุณหภูมิของการทดลองตัวริเริ่มที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จะให้อัตราการเกิดอนุมูลอิสระในช่วง 10^{-7} ถึง 10^{-6} โมลต่อลิตร.วินาที และค่าคงที่อัตราของการสลายตัวอันดับที่หนึ่งอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-5} ต่อวินาที

ตารางที่ 2.7 ตัวริเริ่มอนุมูลอิสระและอุณหภูมิสลายตัว [19]

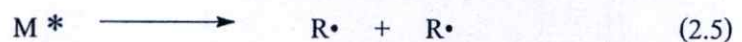
ชื่อ	อุณหภูมิ (°C) ที่เหมาะสมในการเกิดพอลิเมอร์
Potassium persulfate	40-50
Dibenzoyl peroxide	40-90
Cumenehydroperoxide	50-100
Di- <i>t</i> -butylperoxide	80-150
Azo-bisisobutyronitrile (AIBN)	20-100
Cyclohexylsulfonyl acetyl peroxide	0-40
Diisopropyl percarbonate	40-80

(ข) การกำเนิดอนุมูลอิสระด้วยแสง

การกำเนิดอนุมูลอิสระด้วยแสงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวิธีโฟโตเคมีคัลโดยเริ่มจากการที่มอนอเมอร์หรือสารริเริ่มถูกกระตุ้นโดยการรับพลังงานโฟตอนจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เคลื่อนตัวจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า (Excited State)



แล้วมอนอเมอร์ในสถานะเร้าจะแตกสลายตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ 2.5

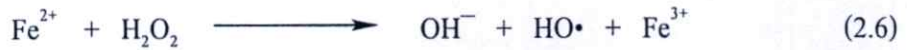


หลังจากนั้นอนุมูลอิสระที่ได้จะเริ่มเข้าร่วมตัวกับมอนอเมอร์เกิดการพอลิเมอไรเซชัน

(ค) การเกิดอนุมูลอิสระโดยใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์

สารเคมีประเภทนี้ละลายน้ำ อนุมูลอิสระเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 0-50° C ขึ้นอยู่กับระบบรีดอกซ์ที่เลือกซึ่งมีหลายระบบ เช่น เปอร์ออกไซด์ผสมอยู่กับตัวริดิซซ์ ได้แก่ ไอออนเหล็ก (Fe^{2+}) โครเมียม (Cr^{2+}) วานาเดียม (V^{2+}) ทิทาเนียม (Ti^{3+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) เป็นต้น

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันหรือปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นจำนวนมากให้อนุมูลอิสระที่สามารถริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ วิธีที่ใช้กันมากและใช้กันมาช้านาน ได้แก่ น้ำยาเฟนต์ัน (Fenton's reagent) ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจน (II) อีออน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารทั้งสองทำปฏิกิริยากันเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซี ดังสมการที่ 2.6



นอกจากนี้มอนอเมอร์บางประเภททำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มเสียเองเกิดเป็นคูรีดอกซ์ขึ้น เช่น Acrylamide ผสมกับThiosulfate หรือ Methacrylic acid ผสมกับ Methyl methacrylate โดยมี N,N-dimethylaniline ปนอยู่ด้วย

(ง) การเกิดอนุมูลอิสระด้วยรังสี

โดยการใช้รังสีพลังงานสูงมาริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อนุภาคแอลฟา อิเล็กตรอนพลังงานสูง เหนี่ยวนำให้มอนอเมอร์สลายตัวเป็นอนุมูลอิสระ โดยโมเลกุลในระบบ (มอนอเมอร์และตัวทำละลาย) จะดูดกลืนพลังงานแล้วสลายให้อนุมูลอิสระ ซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างยุ่งยากเพราะนอกจากจะมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้นแล้วยังมี ไอออนบวกและไอออนลบที่เกิดจากการสลายตัวของมอนอเมอร์เกิดขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ โลหะอัลคิล เป็นตัวริเริ่มที่สามารถให้อนุมูลอิสระในช่วงอุณหภูมิ -20°C ถึง -60°C เชื่อว่ากลไกปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้และเพราะสารประเภทนี้สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำจึงต้องเตรียมที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและใช้ทันทีหลังจากเตรียมได้

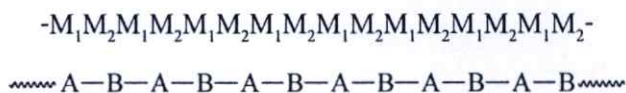


2.6.2.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง (Graft Copolymerization) [15-18, 19-22]

การเกิดพอลิเมอร์ร่วม (Copolymerization) หมายถึง การนำมอนอเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาพอลิเมอร์ไรเซชันเข้าด้วยกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีกว่าการใช้มอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ คือ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติรวมข้อดีของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิด นำไปใช้งานได้ตามความต้องการและสมบัติดังกล่าวจะต่างไปจากการนำโพลิเมอร์สองชนิดมาผสมกันด้วยวิธีทางกายภาพ การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์อาจทำในตัวทำละลาย หรือในสารละลายที่มีมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ปนอยู่ กลไกปฏิกิริยามีทั้งแบบขั้นและแบบลูกโซ่แต่แบบหลังสำคัญกว่าโดยการเลือกมอนอเมอร์ที่เหมาะสม เช่น M_1 และ M_2 และริเริ่มปฏิกิริยาคด้วยอนุมูลอิสระหรือไอออน

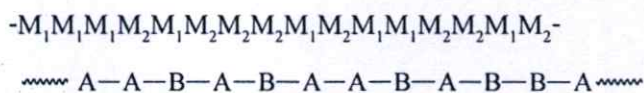
พอลิเมอร์ร่วมสามารถจำแนกออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะการจัดเรียงตัวของหน่วยที่ซ้ำๆ กันในโมเลกุลออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ (Alternating copolymer) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิดกระจายอยู่สลับกันอย่างเป็นระเบียบตลอดสายโซ่ ตัวอย่างเช่น Styrene-maleic anhydride (SMA) สำหรับพอลิเมอร์ที่เกิดจากกลไกแบบขั้นซึ่งมีมอนอเมอร์ (A-A) และ (B-B) จัดเป็นโคพอลิเมอร์แบบสลับได้เช่นกัน



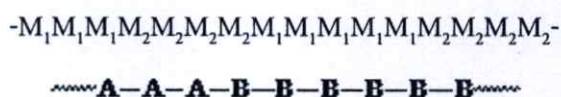
รูปที่ 2.10 พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ [18]

2. พอลิเมอร์ร่วมแบบกระจายหรือแบบสุ่ม (Random copolymer) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิดกระจายอยู่ตลอดสายโซ่ ตัวอย่างเช่น ยาง Styrene-butadiene (SBR) ยาง Acrylonitrile-butadiene (NBR)



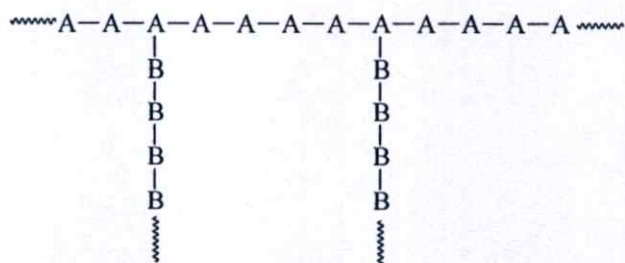
รูปที่ 2.11 พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม [18]

3. พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (Block copolymer) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะมอนอเมอร์ชนิดที่ 1 ต่อกันเป็นพอลิเมอร์สั้นๆ แล้วเชื่อมต่อกับมอนอเมอร์ชนิดที่ 2 ที่เชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์สั้นๆ เช่นกัน ตัวอย่าง เช่น Styrene-butadiene (SB) หรือ Spandex และโคพอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทนกับพอลิเอสเทอร์



รูปที่ 2.12 พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม [18]

4. พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง (Graft copolymer) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีกิ่งสาขาที่เกิดจากการต่อสายโซ่ของมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งบน โครงหลักของโฮโมพอลิเมอร์อีกชนิด ตัวอย่างเช่น ยางธรรมชาติ กับ Methyl methacrylic acid



รูปที่ 2.13 พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง [18]

พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งเกิดจากการมีจุดอวบน้ำเกิดขึ้นที่สายโซ่หลักไม่ใช่อุณหภูมิที่ปลายสายโซ่แล้วเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไป วิธีที่ใช้กันมากคือ ใช้แสงอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการดึงอะตอมไฮโดรเจนออกจากสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดแรดิคอลในสายโซ่พอลิเมอร์ แล้วเติมมอนอเมอร์ชนิดที่สองลงไป การเกิดการตอที่กิ่งสาขานี้ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ร่วมที่ได้ดีขึ้น ซึ่งกลไกการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกิ่งอาจเป็นแบบอนุมูลอิสระหรือแคตไอออนิกแต่ส่วนใหญ่จะเป็นกลไกแบบอนุมูลอิสระ

ดังนั้นการตอกิ่งบนเส้นใยไหมจึงเป็นการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบหนึ่งเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของเส้นไหมหลังจากการลอกท้าว โดยการนำเส้นไหมมาตอกิ่งด้วยมอนอเมอร์ ซึ่งมอนอเมอร์ที่นิยมใช้มีหลายชนิดซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ มอนอเมอร์ที่มักนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของไหม ได้แก่ อีพอกซีเรซิน ไคเบสิกแอนไฮไดรด์ และพวกไวนิลมอนอเมอร์ ได้แก่ Styrene MMA MAA และ HEMA เป็นต้น โดยไวนิลมอนอเมอร์จะแทรกซึมเข้าไปยังเมตริกซ์ของเส้นใยแล้วจึงเกิดพอลิเมอร์ร่วมตรงตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยไฟโบรอิน ได้แก่ หมู่คาร์บอนิล เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิลต่างๆ ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ของกรดอะมิโน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในส่วนนี้จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างโปรตีนทำให้เส้นใยที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น

2.7 สารให้สี (Colorants) [1-2, 7-9, 14, 23-32]

สารให้สี สำหรับสิ่งทอ คือ ผงสี (Pigment) และสีย้อม (Dyestuffs)

2.7.1 ผงสี (Pigment)

ผงสีเป็นสีที่มีขนาดเล็กและเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ มักติดอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยโดยการใส่เรซินลงไป ผงสีจึงจะรวมตัวได้กับเส้นใย ผงสีมีอยู่จำนวนมากมายที่ให้สีแตกต่างกัน การใช้ผงสีในการย้อมผ้า เรียกว่า การย้อมด้วยผงสี (Pigment dyeing) ซึ่งมีขั้นตอนง่ายๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การจุ่มอัดเรซิน (Padding) การทำให้แห้ง (Drying) และการทำให้ยึดติด (Fixing) ส่วนใหญ่มักเติมผงสีลงไปในการละลายที่จะนำมาปั่นในระหว่างกระบวนการผลิตเส้นใย

2.7.2 สีย้อม (Dyestuffs)

สีย้อม คือ สารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนและสะท้อนความยาวคลื่นของแสงภายในช่วงที่มองเห็นได้ โมเลกุลของสีย้อมต้องมีระบบคอนจูเกต (Conjugated system) โครงสร้างของสีย้อมจะมีหมู่พิเศษที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophores) และออกโซโครม (Auxochromes) โครโมฟอร์เป็นตัวให้สี ได้แก่ หมู่อะโซ (Azo group : $-N=N-$) หมู่อะโซซี (Azoxy group) หมู่ไนโตรโซ ($-N=O-$) หมู่ควินอยด์ (Quinoid) และออกโซโครมเป็นหมู่ธาตุที่มีพันธะต่อเนื่องกับโครโมฟอร์ ได้แก่ หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl : $-CO-$) หมู่เอมีน (Amines : $-NH_2$, $-NHCH_3$ หรือ $N(CH_3)_3$) หมู่

อัลคอกซี (Alkoxy : $-OC_2H_5$ หรือ $-OCH_3$) หมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy : $-OH$) และหมู่ซัลโฟเนต (Sulfonates : $-SO_3H$ หรือ $-SO_3Na^+$) เป็นตัวทำให้สีเข้มยิ่งขึ้นหรือรับสียอมได้มากขึ้นเพราะ ออกโซโครมจะช่วยทำให้สียอมละลายน้ำได้ดีมากยิ่งขึ้นและทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสียอมกับ เส้นใยให้มากขึ้น ซึ่งสีที่เราเห็นนั้นเป็นสีจากความยาวคลื่นทั้งหมดที่ไม่ได้ถูกดูดกลืน ปกติสียอมจะ กระจายไปในโครงสร้างภายในของเส้นใยจากสารละลายและติดอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานภายใน เส้นใย ถึงแม้ว่าโมเลกุลของสียอมจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่สามารถซึมเข้าไประหว่างโมเลกุล ของเส้นใยได้เนื่องจากโมเลกุลของสียอมมีขนาดเล็กกว่าช่องว่าง (Pore) ระหว่างโมเลกุลของเส้นใย จึงเกิดการย้อมติดสีขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพแต่ไม่ทำให้สมบัติทางเคมีของ เส้นใยเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วสียอมจะคงอยู่ภายในเส้นใยโดยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิกหรือการยึดจับทางกล มีสียอมเพียงไม่กี่ชนิดที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยพอลิเมอร์โดย เกิดพันธะโควาเลนต์กับเส้นใยพอลิเมอร์ เมื่อโมเลกุลของสียอมผ่านช่องว่างเข้าไปภายในเส้นใยแล้ว เส้นใยจะค่อยๆ มีโมเลกุลของสียอมมากขึ้น สีก็จะมีความเข้มมากขึ้น ไปตามลำดับ

เมื่อนำเส้นใยไปแช่น้ำจะเกิดการพองตัวในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ ชอบน้ำ ซึ่งจะเกิดเฉพาะบริเวณช่องว่างของเส้นใยทำให้ช่องว่างนี้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเส้นใย ทุกชนิดมีขนาดช่องว่างไม่เท่ากัน ขนาดโมเลกุลของสียอมก็ไม่เท่ากันด้วย จึงทำให้สียอมบางตัว ย้อมเส้นใยบางชนิดติดหรือไม่ติดได้และการที่สียอมมีขนาด โมเลกุลที่ไม่เท่ากันนี้ทำให้สียอมที่มี ขนาดเล็กกว่าซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยได้รวดเร็วกว่า แต่สียอมที่มีขนาดใหญ่กว่าจะคงอยู่ในเส้นใย ได้นานกว่า

การเพิ่มอุณหภูมิในขณะที่ย้อมเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยทำให้โมเลกุลของสียอมแทรกตัวเข้าสู่เส้นใย ได้เร็วขึ้น โดยสียอมจะเคลื่อนตัวเข้าสู่เส้นใยจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งเป็นจุดที่เส้นใยและสียอมมี สัมพันธภาพทางเคมีเท่ากัน

เมื่อโมเลกุลของสียอมผ่านช่องว่างเข้าไปภายในเส้นใยแล้ว เส้นใยจะค่อยๆ มีโมเลกุลของสียอม เพิ่มขึ้น สีก็จะมีความเข้มมากขึ้น ไปตามลำดับ ปริมาณของสียอมที่จะยึดติดเส้นใยได้มากน้อยเท่าไร ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Reactive group) ของสียอมและเส้นใยนั้นๆ

กลไกที่เกี่ยวข้องกับการย้อมสีที่สำคัญมีอยู่ 3 กลไกด้วยกัน ได้แก่ [7, 23-24]

1. การดูดซับของสียอมที่ผิวของเส้นใย (Sorption)

2. การดูดซึมของสียอมเข้าสู่เส้นใย (Diffusion)

3. การคงทนของสีบนเส้นใย (Retention) โดยอาศัยกลไกทางเคมีและกายภาพ เนื่องจาก สียอมธรรมชาติเป็นสีที่ละลายน้ำได้ เมื่อนำเส้นใยที่ย้อมด้วยสีเหล่านี้ไปทำความสะอาด โมเลกุล ของสีที่ยึดติดกับเส้นใยจะหลุดออกแล้วทำให้เกิดการตกของสีขึ้นซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถ แก้ไขได้โดยการใช้นอร์แดนท์ (Mordant) ซึ่ง โมเลกุลของมอแดนท์จะรวมตัวกับ โมเลกุลของสียอม

ธรรมชาติแล้วทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้นทำให้เส้นใยที่ย้อมด้วยสีเหล่านี้มีความคงทนต่อการซักเพิ่มขึ้น

การที่จะย้อมสีให้ได้ผลดีนั้น แรงยึดเหนี่ยวของสีย้อมกับเส้นใยต้องมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของสีย้อมกับน้ำ โมเลกุลของสีย้อมจะต้องมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการยึดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น

กลไกในการยึดเหนี่ยวสีให้ติดกับเส้นใยนั้นมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ [24-25]

1. การดูดซับด้วยแรงทางเคมีฟิสิกส์ (Physiochemically)

แรงชนิดนี้เป็นแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อน สามารถถูกทำลายได้ง่าย ตัวอย่างของแรงชนิดนี้ ได้แก่

-แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals' forces) เป็นแรงอย่างอ่อนๆ ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติทำให้สีย้อมกับเส้นใยมายึดติดกันตัวเอง ตัวอย่างเช่น แรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสกับสีย้อมเวทีหรือสีไครเรท

-พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy group) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่นได้ ได้แก่ พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ

-แรงกระทำระหว่างไอออนหรือแรงไอออนิก (Ionic interaction or Ionic forces) เกิดขึ้นได้จากความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อเส้นใยอยู่ในน้ำจะแสดงความเป็นลบและส่วนใหญ่สีย้อมซึ่งละลายในน้ำเป็นแอนไอออน การดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนโดยการเติมเกลือลงในน้ำย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสและเติมกรดลงในน้ำย้อมสำหรับเส้นใยโปรตีนและไนลอนจะเป็นการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีอยู่ในเส้นใยได้ แต่สีย้อมบางประเภทซึ่งเป็นแคทไอออนอยู่แล้ว เช่น สีที่ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก สีย้อมประเภทนี้จึงสามารถเกิดแรงไอออนิกกับเส้นใยได้ง่าย

-แรงกระทำระหว่างหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic interactions)

ตัวอย่างกลไกการดูดซับด้วยแรงทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ การย้อมสีเส้นใยฝ้ายด้วยสีไครเรทและการย้อมเส้นใยโพลีเอไมด์ด้วยสีแอสิด

2. การเกิดพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะทางเคมี (Covalent bond)

ในกรณีของสีรีแอคทีฟสามารถยึดกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่กล่าวมาข้างต้น

3. การถูกกักทางเชิงกลในเส้นใย (Mechanically entrapped)

ตัวอย่างกลไกการถูกกักทางเชิงกลในเส้นใย ได้แก่ การย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีซัลเฟอร์และสีแว็ตซึ่งโมเลกุลของสีจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายน้ำได้เมื่อเข้าไปอยู่ในเส้นใยอีกตัวอย่างหนึ่งของการถูกกักทางเชิงกล ได้แก่ การย้อมเส้นใยขนสัตว์ด้วยสิมอร์แดนท์

สีย้อมสามารถจำแนกตามแหล่งที่มาได้ 2 ประเภท คือสีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyes) และสีย้อมธรรมชาติ (Natural dyes) [7-9, 14]

2.7.2.1 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyes) [30-32]

เป็นสีที่ได้จากการที่นักวิทยาศาสตร์นำเอาสารเคมีต่างๆ มาทำปฏิกิริยากันหรือประกอบเข้าด้วยกันในห้องทดลองหรือโรงงาน เป็นสีที่มีตัวสีหรือเนื้อสีปนอยู่เป็นปริมาณที่เข้มข้นมากทำให้ได้สีที่เข้ม เมื่อนำไปย้อมและสามารถใช้ในปริมาณน้อยๆ ได้ ทำให้สะดวกในการใช้ ส่วนใหญ่สีย้อมสังเคราะห์เป็นออกไซด์ของโลหะหนัก มีหลากหลายสี ทนแดด ทนร้อน คงทนต่อการซักล้าง ย้อมติดเส้นใยทุกชนิด ผลิตได้ที่ละมากๆ เก็บรักษาง่าย ราคาถูก ทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก นอกจากนี้สีย้อมสังเคราะห์ยังอาจมีสารเคมีที่ป้องกันการตกสีผสมอยู่ด้วย ตัวอย่างของสีย้อมสังเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. สีย้อมแอซิด (Acid dye) [31-32]

เป็นสีที่เมื่อละลายน้ำจะมีประจุลบ ส่วนของสีที่มีประจุลบนี้จะเป็นส่วนที่ยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย พันธะที่เกิดขึ้นเป็นพันธะไอออนิก การย้อมสีบางชนิดจะต้องมีการใช้สารช่วยติดสี (Mordant) สีย้อมแอซิดไม่ทนต่อการซักและแห้ง

สีแอซิดมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับสีโคเร็กซ์มากแต่คุณสมบัติในการดูดซึมและจับติดเส้นใยเซลลูโลส (เช่น เส้นใยฝ้ายและเรยอน) จะดีกว่าสีโคเร็กซ์ ที่เรียกว่าสีแอซิดเนื่องจากสีชนิดนี้สามารถย้อมได้ดีและดูดซึมได้รวดเร็วในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดและอีกประการหนึ่ง คือโครงสร้างโมเลกุลของสีส่วนใหญ่เป็นเกลือโซเดียมของพวกกรดอินทรีย์

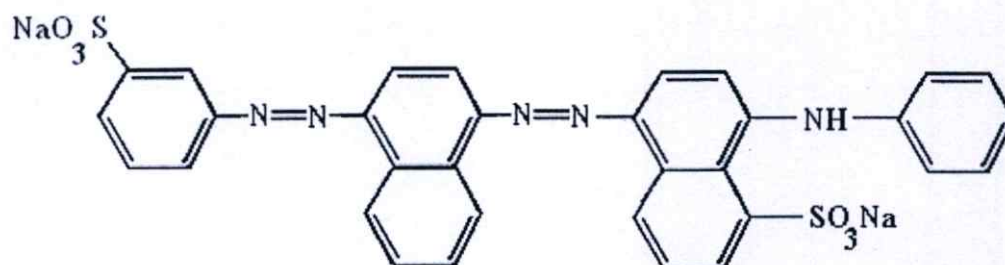
สีแอซิดเหมาะสำหรับใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน (เช่น ไหมและขนสัตว์) และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด (เช่น ไนลอน)

สีแอซิดสามารถจำแนกตามลักษณะการย้อมออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

กลุ่มที่ 1 (Levelling Dyeing Acid Dyes) สีกลุ่มนี้สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี เพราะสีกระจายเป็นโมเลกุล ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มๆ ทำให้ได้ผลการย้อมสีสม่ำเสมอ การย้อมสีจะทำในสภาพเป็นกรดช่วงพีเอช (pH) 2-3 โดยการใช้กรดแก่ เช่น กรดกำมะถัน และเนื่องจากเป็นสีที่มีขนาดอนุภาคเล็กขณะกระจายตัวในน้ำจึงสามารถดูดติดเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปจึงมักใช้ร่วมกับเกลือโซเดียมซัลเฟต (Glauber's salt) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยชะลอการดูดซึมและจับผิววัสดุ สีในกลุ่มนี้มีความคงทนต่อแสงโดยทั่วไปดี แต่ความคงทนต่อการซักไม่ดี

กลุ่มที่ 2 (Milling Dyeing Acid Dyes) สีกลุ่มนี้การกระจายตัวไม่ดี แต่ให้คุณสมบัติด้านความคงทนต่อการซักสูงกว่ากลุ่มแรก การย้อมจะได้ผลดีในน้ำย้อมที่จุดเดือดที่มีสภาพเป็นกรดช่วง pH 5.2-6.2 การย้อมสีกลุ่มนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เกลือ เพราะเมื่อ pH ของอ่างย้อมมากกว่า 4.7 การเติมเกลือลงไปแทนที่จะทำหน้าที่ชะลอการจับติดสี กลับทำให้เร่งการดูดติดสีทำให้เกิดการย้อมค้างขึ้น สีใน

กลุ่มนี้มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสีในกลุ่มแรก ตัวอย่างของสีแอสิดในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีข้อมแอสิด C.I. Acid Blue 113 ดังรูปที่ 2.14

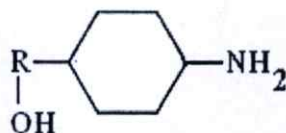


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างสีข้อมแอสิด C.I. Acid Blue 113 [32]

กลุ่มที่ 3 (Neutral Dyeing Acid Dyes หรือ Super Milling) เป็นสีที่จะกระจายตัวเป็นวันที่อุณหภูมิต่ำ แต่ที่อุณหภูมิสูงเกือบจุดเดือดจะกระจายเป็นโมเลกุล เป็นสีที่ข้อมให้ติดสม่ำเสมอได้ยาก การข้อมจะได้ผลดีในน้ำข้อมที่มีสภาพเป็นกลางหรือเป็นกรดน้อยมากที่จุดเดือด โดยทั่วไปจะใช้พวกเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) เช่น แอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium Acetate) หรือแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium Sulphate) แต่ในกรณีที่จำเป็นอาจจะใช้เกลือโซเดียมซัลเฟตแทนก็ได้ สีกลุ่มนี้จะให้ความคงทนต่อแสงและการซักดี มีขนาดโมเลกุลใหญ่เมื่อเทียบกับสองกลุ่มแรก

2. สีข้อมเบสิก (Basic dyes) [24]

สีเบสิกเป็นสีสังเคราะห์ที่มีความเก่าแก่ที่สุด เมื่อใช้ในการข้อมเส้นใยเซลลูโลสจะมีความคงทนต่ำ แต่สีเบสิกมักนำมาข้อมเส้นใยอะคริลิกเนื่องจากให้ความคงทนสูงกว่าในการใช้ข้อมเซลลูโลส นิยมใช้ในการข้อมที่ต้องการสีสดใสมากกว่าความคงทน โมเลกุลของสีข้อมมาจากส่วนประกอบและไอออนที่เป็นแคทไอออน โดยมีสูตรทั่วไป ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สูตรโครงสร้างทั่วไปของสีข้อมประเภทเบสิก [24]

สีเบสิกจัดอยู่ในกลุ่มสีที่ให้สีสันและความเข้มมากกว่าสีตัวอื่นๆ เช่น เบสิกมาเจนตา (Basic Magenta) กับแอสิดมาเจนตา (Acid Magenta) ซึ่งทั้งสองตัวมีโครงสร้างอย่างเดียวกัน โดยนำมาทำให้เป็นกรดด้วยวิธีซัลโฟเนชัน (Sulphonation) เมื่อใช้แอสิดมาเจนตาต้องใช้สีถึง 5% จึงจะได้รับความเข้มเท่ากับสีเบสิกมาเจนตาเพียง 2-3% ทำให้ยังมีผู้นิยมใช้ในประโยชน์บางอย่างเพราะความคงทนของสีค่อนข้างต่ำ

สีข้อมเบสิกจะละลายในแอลกอฮอล์แต่ละลายในน้ำได้ยาก สีเบสิกบางตัว เช่น Auramine (C.I. Basic Yellow 2) จะละลายในน้ำเดือดจึงต้องข้อมที่อุณหภูมิ 60-65° C แม้ว่าสีค่อนข้างจะคงทนแต่ อาจเกิดการสลายตัวไปบ้างเมื่อต้มเป็นเวลานานๆ ถ้านำสีเบสิกไปทำปฏิกิริยากับด่างจะสลายตัวเป็น เบสของสีข้อม (Dye base) ซึ่งไม่มีสี นอกจากนี้สีข้อมที่มีด่างหรือเป็นน้ำกระด้างใช้ข้อมสีเบสิก ไม่ได้ จึงต้องทำให้น้ำข้อมเป็นกลางโดยใช้กรดน้ำส้ม

สีข้อมสังเคราะห์มีความหลากหลายในเฉดสีและคุณภาพ ราคาแตกต่างกันตามคุณภาพของสี ปัจจุบันพบว่าสีข้อมสังเคราะห์บางชนิดเป็นอันตรายต่อทั้งผู้ข้อมและผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ จึงมีการห้ามใช้ และในบางประเทศมีกฎหมายเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์ (บางชนิดและ/หรือทุกชนิด) ที่ข้อมสี ดังกล่าวเข้าประเทศ

ข้อเสียของสีข้อมสังเคราะห์

1. ทำให้เกิดมลพิษสูงในกระบวนการผลิต
2. น้ำทิ้งที่เกิดจากการข้อมสีเคมีทำให้ดินและน้ำเสีย
3. สีสังเคราะห์หลายชนิดเมื่อสลายตัวจะมีพิษต่อผิวหนัง
4. เป็นสีที่ต้องซื้อจากต่างประเทศ เพราะไม่มีการผลิตในประเทศ

2.7.2.2 สีข้อมธรรมชาติ (Natural Dyes)

สีข้อมธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นสีที่สกัดได้จากเนื้อไม้ เปลือกไม้ ใบ รากและผลของพืช และมีสี ข้อมธรรมชาติบางชนิดสามารถสกัดได้จากสัตว์แต่ก็เป็นส่วนน้อย สีที่สกัดได้จากธรรมชาติส่วนใหญ่ นำมาข้อมขนสัตว์ ไหม ผ้ายและลินิน เนื่องจากสีข้อมธรรมชาติมีหลากหลายเพราะมาจาก แหล่งวัตถุดิบธรรมชาติที่แตกต่างกัน ทำให้มีพฤติกรรมในการข้อมแตกต่างกันและยังมีสมบัติทางด้าน ความคงทนของสีที่แตกต่างกันด้วย แต่มีเพียงสีข้อมธรรมชาติเพียงบางส่วนที่ข้อมรับกันอย่าง แพร่หลาย ตัวอย่างสีธรรมชาติที่สกัดมาจากแหล่งของพืชหรือสัตว์ที่สำคัญที่นำมาใช้เป็นสีข้อม ธรรมชาติได้แก่ [26]

1. **Cis-bixin** สกัดได้จากเมล็ดที่เป็นฝัก (Seed pods) ของผลจากต้นไม้ที่เรียกว่า Rocou ซึ่ง ต้นไม้หนึ่งต้นจะให้ผลผลิตเป็นเมล็ดประมาณ 1-3 กิโลกรัมและ 100 กิโลกรัมของเมล็ดสามารถ สกัดเอาสารที่บริสุทธิ์ของ Cis-bixin ได้ 120-160 กรัม เมล็ดที่เป็นฝักสามารถนำมาใช้เป็นอาหาร เนยแข็ง เนยเทียม และน้ำมันได้อีกด้วย ซึ่งต้นไม้ Rocou ปลูกที่อเมริกาใต้ตอนกลางและสามารถ เก็บเกี่ยวเมล็ดได้ปีละ 500 ตัน โครงสร้างทางเคมีเป็นพวก Annatto ซึ่งจะอยู่ในประเภทเดียวกันกับ Carotenoid ซึ่งโครงสร้างจะมีพันธะคู่สลับ (Conjugated double bond) อยู่ตลอดสายโซ่โมเลกุล เฉดสีที่ข้อมได้จาก Cis-bixin จะให้เฉดสีส้มแดง

2. **Carminic acid** (Cochineal) สกัดได้จากแมลงเทศเมียที่เรียกว่า Cochineal (Coccus cacti) ซึ่ง สารที่สกัดได้สามารถนำไปใช้เป็นสีข้อมสำหรับไหม และขนสัตว์ และยังใช้เป็นสีผสมอาหารและสี ที่ใช้ในเครื่องสำอาง แมลงที่ตากแห้ง 1 กิโลกรัม สามารถสกัดสีข้อมที่บริสุทธิ์ได้ 50 กรัม แมลงที่

เลี้ยงอยู่ตามไร่สามารถจับได้ปีละ 3 ครั้ง ส่วนแมลงในไร่ของพืชต้นตะบองเพชรที่เติบโตอย่างธรรมชาติสามารถจับได้ปีละ 6 ครั้ง ซึ่งสามารถนำเป็นจำนวนแมลงที่จับได้ 300 กิโลกรัมต่อปี ต่อ 1 ฮา (ha) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ Cochineal จะคล้ายคลึงกับ โครงสร้างทางเคมีของกรด Kermesic ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ Anthraquinones เช่นกัน Cochineal เจดสีที่ได้เป็นเจดสีส้มแดงเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อใช้มอร์แคนท์เป็นพวกคิบูกในการข่มขนสัตว์จะให้เจดสีแดงสดในการข่อมใหม่จะได้เจดสีแดงสดเช่นกันเมื่อใช้มอร์แคนท์ที่เป็นพวกอะลูมิเนียมหรือคิบูก

3. **Carotene** สกัดได้จากแครอทหรือเม็ดผักทอง ส่วนใหญ่ใช้เป็นสีผสมในอาหารและยาเป็นหลัก แครอท 1 ตัน สามารถสกัดสารแคโรทีนบริสุทธิ์ได้ 67 กรัม สีที่สกัดได้จะเป็นสีส้ม โครงสร้างทางเคมีของสารชนิดนี้จัดอยู่ในพวก Carotenoids ซึ่งจะมีพันธะคู่สลับอยู่ตลอดสายโซ่โมเลกุลดับของพวกเราสามารถทำหน้าที่เปลี่ยน Carotenoid ให้เป็นวิตามิน A และในเนื้อเยื่อชั้นในสุดของลูกตาที่เรียกว่า Retina ซึ่งทำหน้าที่รับภาพและมีความไวต่อแสงมาก ทั้งนี้เพราะ Retina จะประกอบไปด้วยรงควัตถุสีที่ไวต่อแสงซึ่งเป็นส่วนประกอบของโปรตีนร่วมกับ Carotenoids

4. **Carthamine** สกัดได้จากดอกไม้ของดอกคำฝอย (Safflower : *Carthamus tinctorius*) สีที่สกัดได้จะเป็นสีเหลืองจากการใช้น้ำเป็นตัวสกัด

5. **Curcumin** เป็นสารที่อยู่ในรากของหัวพืชที่อยู่ใต้ดินของพืชตระกูลขมิ้น (*Curcuma* genus) พืชชนิดนี้มีต้นกำเนิดจากเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 1 กิโลกรัมใช้สกัดสีข้อมได้ 30-50 กรัม สีข้อมที่สกัดได้สามารถนำไปข่มขนสัตว์ ฝ้ายและไหม ได้หลายเจดสี เช่น สีเหลือง แดงถึงดำอมน้ำตาล

6. **Euxanthinic acid** เป็นกรดที่เอามาจากน้ำปัสสาวะของวัวควาย ซึ่งสัตว์ 1 ตัวจะให้กรดชนิดนี้วันละ 50 กรัม ต้นกำเนิดการใช้กรดประเภทนี้ คือ ประเทศอินเดีย

7. **Fustine** และ **Fisetine** สกัดได้จากต้นไม้ในตระกูลเบอร์รี่ที่มีอายุไม่มาก (*Young fustic*) ซึ่งเป็นไม้ที่นำมาข้อมสีและให้เจดสีเหลืองอ่อน โครงสร้างทางเคมีของสีข้อมที่สกัดได้จัดอยู่ในพวก Flavonoid

8. **Haematin** สกัดได้จากต้นไมชนิดหนึ่งที่เรียกว่า Logwood ที่มีอายุระหว่าง 10-12 ปี และต้นไมชนิดนี้ปลูกในภูมิภาคเขตร้อนของเม็กซิโก และอเมริกาตอนกลางการสกัดสารดังกล่าวทำได้โดยการหมักท่อนไม้ Logwood ที่เป็นท่อนๆ ในสารออกซิไดส์ เช่น Nitrites Chlorates หรือ Chromates อัตราการเกิดออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเมื่อเติมค่าลงไป โครงสร้างทางเคมีของรงควัตถุนี้เป็นชนิด Dihydropyrans เมื่อนำสีข้อมที่สกัดได้มาข่อมใหม่ ขนสัตว์ ฝ้ายจะได้เจดสีดำเข้มและเมื่อนำสีข้อมที่สกัดได้มาใช้ข่อมเส้นใยพวกพอลิเอไมด์ (Polyamide) ได้เจดสีน้ำเงินและดำ

9. **Hypericin** เป็นสีที่สกัดได้ในอัตราส่วน 1.2-1.5 กรัมต่อกิโลกรัมของดอก St. John'wort ที่แห้ง เจดที่ได้จากการข่อมขึ้นอยู่กับมอร์แคนท์ที่ใช้ ซึ่งจะให้เจดสีต่างๆ เช่น เหลือง ชมพูดำอมน้ำเงิน ถ้าไม่ใช้มอร์แคนท์ในการข่อมให้เจดสีม่วงแดงสำหรับการข่อมเส้นใยขนสัตว์

10. Indigo เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมขนสัตว์และผ้าและนิยมใช้ย้อมผ้าอินเป็นหลักเป็นสารที่สกัดได้จากพืชตระกูล Indigofera และ Woad และเมื่อนำมาย้อมจะได้เฉดสีครามหรือสีน้ำเงิน ใบหรือดอกของพืชตระกูล Indigofera ปริมาณ 300 กิโลกรัม หรือต้น Woad ปริมาณ 900 กิโลกรัม ให้สีย้อม 1 กิโลกรัม การสกัดสีย้อมทำได้โดยการเก็บใบที่ได้จากพืชตระกูล Indigofera แล้วนำมาแช่ลงในอ่างน้ำเป็นเวลา 9-14 ชั่วโมง เเปอร์เซ็นต์สีย้อมที่สกัดได้จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความสดของใบและความชื้นที่มีอยู่ในใบ หลังจากนั้นใช้ไม้ไผ่ตีใบที่แช่อยู่ในอ่างเพื่อให้ของเหลวที่สกัดออกมาจากใบเกิดการออกซิไดส์กับอากาศ มีผลทำให้สีของของเหลวค่อยๆ เปลี่ยนจากเฉดสีส้มหรือเหลืองไปเป็นเฉดสีเขียวเข้มหรือน้ำเงินเมื่อการเกิดออกซิไดส์กับอากาศได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของอินดิโก หลังจากนั้นเอาน้ำที่อยู่ส่วนบนออก แล้วย้ายตะกอนอินดิโกจากอ่างไปไว้ในภาคน้ำขนาดใหญ่ ต้มให้ร้อนเพื่อป้องกันการเกิดการหมักต่อเนื่อง แล้วปล่อยให้เย็น แล้วกรองเอาตะกอนของอินดิโกผ่านผ้ากรอง ตะกอนที่กรองได้จะวางไว้บนถาดเพื่อนำไปตากแห้ง เมื่อแห้งสนิทจะได้แป้งแข็งของตะกอนอินดิโกก่อนนำไปตัดแบ่งเป็นก้อนเพื่อขายต่อไป

11. Juglan เป็นรงควัตถุที่สกัดได้จากเปลือกวอลนัทสด (Fresh walnut shells) ซึ่งเปลือกวอลนัทสด 1 กิโลกรัม จะสกัดรงควัตถุสีดังกล่าวได้ 2 กรัม รงควัตถุที่สกัดได้นอกจากเรียกว่า Juglan แล้วยังสามารถเรียกว่า Juglone หรือ Regianin ได้ สีย้อมที่สกัดได้นำมาใช้ย้อมขนสัตว์ได้เฉดสีเหลืองอมน้ำตาล และได้เฉดสีชมพูเมื่อมีการใช้มอร์แดนท์ที่เป็นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังมีการใช้รงควัตถุที่สกัดได้นี้ ในเครื่องสำอางค์ เช่น โลชั่นกันแดด รงควัตถุที่สกัดได้จัดเป็นสีย้อมประเภทสีแฉด เพราะเมื่อเอาเปลือกของวอลนัทสดมาบดแล้วหมักไว้ 2 วันก่อนนำมาสกัดด้วยน้ำร้อนจะได้สารละลายที่ไม่มีสี หลังจากนั้นเมื่อถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศทำให้โครงสร้างทางเคมีของรงควัตถุที่สกัดได้เปลี่ยนโครงสร้างเป็นพวก Quinone ชนิด Naphthoquinones ทำให้เมื่อนำมาย้อมเส้นใยธรรมชาติจะได้เฉดสีในช่วงน้ำตาลถึงสีเหลือง

12. Kermesic acid เป็นอนุพันธ์ของ Anthraquinone ที่สกัดได้จากแมลงที่เรียกว่า Kermes เป็นแมลงตัวเมียที่พบอยู่บนไม้ไอ้กแถบเมดิเตอร์เรเนียน ซากแห้งของแมลงชนิดนี้ 1 ตัวจะมีกรด Kermesic ประกอบอยู่ 1% กรด Kermesic ละลายได้ในน้ำร้อนและสารละลายที่ได้เป็นสีแดงอมเหลือง ซึ่งเฉดสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อเติมกรดบอริก (Boric acid) และสามารถเปลี่ยนเป็นสีแดงม่วงเมื่อเติมกรดซัลฟูริกที่เข้มข้นลงไป แต่กรดชนิดนี้จะละลายในน้ำเย็นได้น้อยลง แต่เมื่อใช้ มอร์แดนท์ที่เป็นพวกอะลูมิเนียมใส่ในสารละลายกรด Kermesic จะได้เฉดสีแดงสด ซึ่งเป็นเฉดสีที่ได้รับความนิยมมากสำหรับกรด Kermesic

13. Madder dyes เป็นสีที่สกัดได้จากเปลือกของรากของพืชตระกูล Rubia เช่น ต้น Madder สี Madder เป็นสีที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวก Hydroxyanthraquinones เปลือกของรากของต้น Madder 50 กิโลกรัม จะสกัดสีย้อมได้ 1 กิโลกรัม

14. **Laccaic acid** เป็นกรดที่สกัดมาจากแมลงพวก *Coccus Laccae* ที่เกิดอยู่บนเปลือกของต้นไม้ กิ่งของต้นไม้ที่มีแมลงชนิดนี้แพร่พันธุ์อยู่จะปกคลุมไปด้วยเรซินที่มีสีน้ำตาลแดงที่เรียกว่าครั่ง (Lac) ซึ่งครั่งนี้จะถูกเก็บเอามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสีย้อม ซึ่งครั่งจะมีรงควัตถุสีประกอบอยู่ประมาณ 10% ซึ่งสามารถสกัดออกมาได้โดยใช้สารละลายร้อนของโซเดียมคาร์บอเนตและได้สีย้อมตกตะกอนแยกออกมา เมื่อเติมสารส้มหรือปูนขาวลงไป โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมที่สกัดได้จากครั่งเป็นอนุพันธ์ของ Anthraquinones สีย้อมที่สกัดได้เมื่อนำมาใช้ย้อมขนสัตว์และใช้มอร์แดนท์ที่เป็นพวกอะลูมิเนียมหรือดีบุกจะให้เฉดสีแดง

15. **Lawson** สกัดได้จากใบของต้นเฮนนา (Henna) ซึ่งปลูกในประเทศอินเดียและอียิปต์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใบเฮนนามีสารนี้ประกอบอยู่ด้วย 1% และมีโครงสร้างทางเคมีเป็น 2-hydroxy-1, 4-naphthoquinone เมื่อสกัดด้วยน้ำร้อนได้สีย้อมที่เป็นสีเหลืองที่สามารถนำมาย้อมขนสัตว์และไหมเมื่อย้อมเสร็จแล้วได้เฉดสีที่เป็นสีส้มนอกจากนี้ สีย้อม Lawson ที่สกัดได้ยังสามารถนำมาใช้ย้อมผมได้เป็นเฉดสีแดง

16. **Archil** เป็นสารที่พบในไลเคน (Lichen)

17. **Phoenician purple (6,6'-dibromic indigo)** เป็นสารที่พบในเปลือกของสัตว์น้ำประเภทที่มีเปลือกแข็งหุ้มตัว เนื้อในนุ่ม เช่น หอยนางรม หอยทาก ปลาหมึก เป็นต้น สัตว์น้ำประเภทนี้หนึ่งหมื่นตัวจะให้สีย้อมที่บริสุทธิ์ประมาณ 1.2 กรัม

18. **Rutin** สกัดได้จากใบ ดอก และผลของต้นไม้หลายชนิด เช่น จากต้นข้าวสาลี (Buckwheat) ชนิดหนึ่งหรือต้นเบอร์รี่สีเหลืองของจีน (Chinese yellow berries) สามารถใช้ย้อมขนสัตว์และไหมให้เฉดสีเหลืองมะนาวเมื่อใช้มอร์แดนท์พวกสารส้ม (Alum) ที่ประเทศจีนเคยใช้สีที่สกัดได้นี้ย้อมบนผ้าขนสัตว์ที่นำมาทำเป็นเสื้อคลุมยาวแบบจีน (Mandarins' robes)

ข้อดีของสีย้อมธรรมชาติ [27]

1. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ย้อมและผู้บริโภคเพราะทำมาจากพืชผักธรรมชาติและน้ำสีที่เหลืออยู่ก็ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
2. วัตถุดิบหาได้ในบริเวณบ้าน หมูบ้านและในป่า ไม่ต้องเสียเงินซื้อ ทำให้ขาดดุลการค้าเมื่อสั่งซื้อจากต่างประเทศและสีที่ส่งจากต่างประเทศบางครั้งก็เป็นสีไม่มีคุณภาพด้วย
3. สีธรรมชาติสามารถเรียนรู้และพัฒนาได้ด้วยตนเอง เป็นภูมิปัญญาของบรรพบุรุษไทย ทำให้ชาวบ้านมองเห็นคุณค่าของต้นไม้ และรู้จักใช้ประโยชน์ของต้นไม้สูงสุด และสามารถควบคุมเทคโนโลยีของตนเองได้ แต่ถ้าเมื่อใดมีการซื้อสีเคมีก็จะสร้างความคุ้นเคยกับการพึ่งพาดลาดสากลสูญเสียการรู้จักช่วยตนเอง
4. สีธรรมชาติทำให้เกิดสีใหม่ สีแก่ สีเข้ม สีอ่อน ได้หลากหลายตามการใช้มอร์แดนท์ ได้แก่สารส้ม ค่าง น้ำสนิม หรือ แม้แต่ใบไม้ ก็ให้สีแก่ อ่อนต่างกันไป

5. ในด้านความสัมพันธ์ระหว่างคนย้อมสีกับต้นไม้ คนย้อมสีมองเห็นคุณค่าของต้นไม้มากขึ้น เห็นคุณค่าประโยชน์และไม่ทำลายแต่จะใช้อย่างมีคุณค่าและปลูกทดแทนมากขึ้น

ข้อจำกัดของสีย้อมธรรมชาติ [27]

1. ปัญหาด้านการผลิต คือ ไม่สามารถผลิตได้ในปริมาณมากและไม่สามารถผลิตสีตามที่ต้องการได้
2. สีซีดจางและมีความคงทนต่อแสงน้อย ต้องพัฒนาคุณภาพให้สูงกว่านี้
3. ผู้ซื้อไม่ยอมรับสีธรรมชาติ ต้องมีมาตรฐานให้ผู้ซื้อยอมรับได้
4. ในการย้อมสีธรรมชาติ ถ้าไม่มีวิธีการและจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนจะทำให้ต้นไม้ที่ให้สีถูกทำลาย
5. ปริมาณของตัวสีในวัสดุให้สีมีน้อยจึงย้อมได้สีไม่เข้ม
6. ย้อมให้เป็นสีเดิมได้ยาก

ตารางที่ 2.8 ข้อเปรียบเทียบระหว่างสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์ [2]

สีย้อมธรรมชาติ	สีย้อมสังเคราะห์
1. ความสดใสน้อย	1. ความสดใสมาก
2. สีดกง่าย ซีดจางไว	2. สีไม่ตก ทนทาน
3. มีจำนวนสีให้เลือกน้อย	3. มีจำนวนสีให้เลือกมากกว่า
4. ขบวนการย้อมยุ่งยาก	4. ขบวนการย้อมง่าย

การย้อมสีธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็นการย้อมโดยตรงและการย้อมโดยใช้มอร์แดนท์ โดยสารให้สีบางชนิดที่สกัดจากพืชสามารถยึดติดกับเส้นใยบางชนิดได้ดี เช่น ฝ้าย ลิ้นจี่ แต่อาจจะยึดติดกับเส้นใยบางชนิดได้ไม่ดี เช่น ไหมและขนสัตว์ ตลอดจนสารให้สีบางชนิดที่สกัดจากพืชเมื่อนำมาย้อมกับผ้าหรือเส้นใยแล้ว ผ้าหรือเส้นใยที่ได้จากการย้อมกับสีย้อมเหล่านี้อาจให้สมบัติความคงทนของสีต่อการซักและสภาวะแวดล้อมบางอย่างไม่ดี การย้อมแบบใช้มอร์แดนท์จะช่วยให้เกิดการยึดติดระหว่างตัวสีกับเส้นใยดีขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการย้อมแบบนี้ คือ เมื่อเส้นใยที่ได้ผ่านการย้อมสีและการย้อมด้วยสารละลายมอร์แดนท์แล้ว โลหะของสารละลายมอร์แดนท์จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่แข็งแรงกับสีและเส้นใย ทำให้สีที่ได้จากการย้อมด้วยวิธีนี้มีความคงทน ไม่ตกสีหรือซีดง่าย สารมอร์แดนท์ที่ใช้ คือ สารละลายของเกลือโลหะ ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ คอปเปอร์ซัลเฟต และโพแทสเซียมอะลูมิเนียมเปอร์ซัลเฟต เป็นต้น โดยมอร์แดนท์แต่ละชนิดเมื่อนำมาย้อมร่วมกับสีย้อมธรรมชาติแล้วอาจให้เฉดสีที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของมอร์แดนท์ที่นำมาใช้ย้อมรวมทั้งชนิดของสีย้อมที่นำมาใช้ [28-29]

- มอร์แดนท์ที่ใช้ในงานวิจัย [2]

ชื่อทางเคมี	เกลืออะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟตโดเดคาไฮเดรต (Aluminium potassium sulphate dodecahydrate)
ชื่ออื่นๆ	โพแทสเซียมอะลัม โพแทชอะลัม สารส้ม อะลัม
สูตรโมเลกุล	$AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
คุณสมบัติ	ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ทำลายโอโซน ไม่เสื่อมสภาพ มีความคงทน สารส้มเป็นสารประกอบที่มีไอออนของอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสูตร โครงสร้างทางเคมีของสีและเส้นใยของผ้าทำให้สีเข้มขึ้นและติดบนเส้นใย นอกจากนั้นสารส้มมีคุณสมบัติเป็นกรด อาจทำให้เคลือบเปลี่ยนไปได้

ประโยชน์ด้านอื่นๆ ใช้ในการทำให้ผ้าบริสุทธิ์ ใช้ในการอุตสาหกรรมฟอกหนัง ทำแก้ว นอกจากนี้พบว่าโพแทชอะลัมในสารละลายกรดสามารถช่วยห้ามเลือดได้ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นสารดับกลิ่นได้ดีอีกด้วย

สารที่เรียกว่ามอร์แดนท์ (Mordant) จะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มการติดสีในเส้นใย ช่วยให้สีเกาะติดเส้นใยได้แน่นขึ้น บางอย่างช่วยให้สีทนต่อแสงมากขึ้น ในสมัยโบราณจะใช้การเค็มมูลสัตว์หรือปัสสาวะลงไปจนถึงข้อมแต่ในปัจจุบันมอร์แดนท์ที่ใช้เป็นเกลือของโลหะจำพวกอะลูมิเนียม เหล็ก ดีบุก หรือโครเมียม ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมทางเคมีระหว่างโมเลกุลสีและเส้นใย พืชบางชนิด เช่น ใบและเปลือกลำต้นของไม้ในสกุล *Symplocos spp.* ยังคงนิยมนำมาใช้เป็นมอร์แดนท์ ทั้งนี้สารมอร์แดนท์จะมีผลต่อเคลือบสีที่ได้จากการย้อม เพื่อให้สีติดแน่นทนทานยิ่งขึ้นมีการนำเส้นใยที่ผ่านการย้อมมาแช่ในสารผสมระหว่างปูนและน้ำตาลหรือย้อมด้วยสารสีจากพืช เช่น จากตาดอกของ *Sophora japonica L.* ในการย้อมขั้นสุดท้าย [33]

การย้อมมอร์แดนท์มี 3 แบบ คือ ย้อมมอร์แดนท์ก่อน พร้อมและหลังการย้อมสี [30]

2.8 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากธรรมชาติ [27, 33-47]

ด้วยภูมิปัญญาของคนรุ่นปู่ย่าตายายที่ได้ศึกษาทดลองใช้วัสดุจากธรรมชาติมาใช้ในการย้อมสี โดยการทดลองทำซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งได้องค์ความรู้ในการย้อมสีผ้าด้วยวัสดุจากธรรมชาติที่ไม่เป็นพิษต่อผู้คน สัตว์และสิ่งแวดล้อม เป็นมรดกทางวัฒนธรรมมาสู่ลูกหลาน วัฒนธรรมที่ได้กลับกลายมาเป็นหนึ่งในเครื่องมือหาเลี้ยงชีพของพี่น้องชาวนนท ผู้ซึ่งมีบทบาทและส่วนร่วมโดยตรงในการดำรงไว้ซึ่งวัฒนธรรมอันงดงาม สีย้อมผ้าที่ได้มาจากวัสดุธรรมชาติเกิดจากการใช้ประโยชน์

จากทรัพยากรธรรมชาติหลายๆ อย่าง นับตั้งแต่ต้นไม้และพืช สัตว์ แร่ธาตุ ดังจะพบจากรายละเอียดในตารางข้างล่างนี้

1. สัตว์ธรรมชาติที่ได้จากพืช

ตารางที่ 2.9 ส่วนของพืชที่ให้สีไปใช้ประโยชน์ [27]

ส่วนของต้นไม้	วิธีการให้ได้มาซึ่งสี
ดอก	นำไปแช่และคั้นเอาน้ำสี
ใบและกิ่งก้าน	นำไปหมักและคั้นเอาสี
ผล - เมล็ด	นำไปโขลกและคั้นเอาน้ำสี
เปลือกและแก่น	นำไปต้มน้ำเดือดจะได้สี
ราก	นำไปแช่น้ำและคั้นเอาสี

ตารางที่ 2.10 สัตว์ธรรมชาติที่ได้จากพืช [27]

สีที่ได้จากพืช	ส่วนที่ใช้	สีที่ได้	ใช้ย้อม
1. กระจาย	ผล	ดำ	ฝ้าย
2. กระจูด	เปลือก	เขียว	ฝ้าย
3. กระจาย	หนาม	น้ำตาล (เปลือกไม้)	ฝ้าย
4. กาบมะพร้าว	ผล	แดง ชมพู น้ำตาล	ฝ้าย
5. โกงกาง	เปลือก	น้ำตาลแก่	ฝ้าย
6. ขมิ้น	ราก	เหลือง	ฝ้าย ไหม
7. ข่า	ราก	แดง	ฝ้าย ไหม
8. ขี้เหล็ก	แก่น	เหลืองเข้ม	ฝ้าย ไหม
9. ขนุน	แก่น	เหลือง	ฝ้าย ไหม
10. เข	แก่น (เนื้อไม้)	เหลือง	ไหม
11. คราม	ใบ กิ่งก้าน	น้ำเงินเข้ม	ไหม ฝ้าย
12. คำเงาะ	เมล็ด	แสด ส้ม	ไหม ฝ้าย
13. คำฝอย	ดอก	เหลือง	ไหม ฝ้าย
14. จำลา	เปลือกไม้	นวลอมชมพู	ฝ้าย
15. ดอกทองกวาว	ดอก	ส้ม	ไหม ฝ้าย
16. ดอกอัญชัญ	ดอก	เทาอมฟ้า, น้ำเงิน	ไหม ฝ้าย
17. ต้นแสด	เมล็ด	แสด	ไหม ฝ้าย

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

สีที่ได้จากพืช	ส่วนที่ใช้	สีที่ได้	ใช้ย้อม
18. แดง(มะพูด)	ราก	ทองอ่อน (กระดังงา)	ฝ้าย
19. ประดู่	เปลือก	ม่วง	ฝ้าย
20. ประโหด	เปลือก ลำต้น	เขียวอมเหลือง	ไหม ฝ้าย
21. ปอแดง	เปลือก	แดงอ่อน	ฝ้าย
22. ฝาง	แก่น	แดง	ฝ้าย
23. ฝาง	แก่น	เลือดหมู	ไหม ฝ้าย
24. มะเกลือ	ผล	ดำ	ไหม ฝ้าย
25. มะพูด	เปลือก ลำต้น	เขียวอมเหลือง	ไหม ฝ้าย
26. มะม่วงน้อย	เปลือก	เขียวขี้ม้า	ฝ้าย
27. ตะบูน	เปลือก	น้ำตาล (เปลือกไม้)	ฝ้าย
28. มะหาด หรือ หาด	แก่น	เหลือง	ไหม ฝ้าย
29. ไม้แดง	เปลือก	แดงเลือดหมู	ฝ้าย
30. ไม้ยมว	เปลือกไม้	แดง	ฝ้าย
31. ไม้หูควาย	เมล็ด	ดำ	ฝ้าย
32. ขอบป่า	ราก	น้ำตาล	ไหม ฝ้าย
33. มะริดไม้	เปลือก	เขียว	ฝ้าย
34. สมอ	ผล เปลือกลำต้น	เทา น้ำตาล	ไหม ฝ้าย
35. สลัด	ราก	แดง ชมพู	ไหม ฝ้าย
36. ลกฟ้า	ต้น	น้ำตาล (เปลือกไม้)	ฝ้าย
37. สะกือ	ราก	เหลือง	ฝ้าย
38. สัก	ใบอ่อน เปลือกลำต้น	น้ำตาล	ไหม ฝ้าย
39. ตะโก	ผล	ดำ	ไหม ฝ้าย
40. ตะกี้	ผล	ส้ม (แดงเลือดนก)	ฝ้าย

2. สีธรรมชาติที่ได้จากสัตว์

ตารางที่ 2.11 สีธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ [27]

สีที่ได้จากสัตว์	ส่วนที่ใช้	สีที่ได้	ใช้ย้อม
ครั้ง	ตัวครั้ง	สีแดง, ม่วงแดง	ฝ้าย ไหม

3. สีธรรมชาติที่ได้จากแร่ธาตุ

ตารางที่ 2.12 สีธรรมชาติที่ได้จากแร่ธาตุ [27]

สีที่ได้จากแร่ธาตุ	ส่วนที่ใช้	สีที่ได้	ใช้ย้อม
1. ดินแดง	ดินแดง	สีแดงจากอิฐ	ฝ้าย
2. โคลน	โคลน	สีเทาอ่อน	ฝ้าย

ตารางที่ 2.13 ชนิดของพืชที่นำมาย้อมเส้นไหมให้สีต่างๆ ที่มีระดับความคงทนตามมาตรฐานอุตสาหกรรม [34]

พืช	ส่วนที่ใช้	สารช่วยติดสี	สีที่ได้	ความคงทน	
				แสง	ซัก
สบู่แดง	ใบส่วนยอด	จุนสี	เขียว	6	4
แก้ว	ใบ	จุนสี	เขียว	4	4-5
คนทา	ผล	โคลน	เทาม่วง	4-5	4-5
มะกอกโอลีฟ	ใบ	จุนสี	น้ำตาลเหลือง	6	4-5
เงาะ	เปลือกผล	โคลน	ดำ	6	4-5
หม่อน	ผล	จุนสี	เขียวขี้ม้า	4	4-5
หัวผลใหญ่	ผล	จุนสี	เหลืองนวล	5-6	4-5
มังคุด	เปลือกผล	จุนสี	น้ำตาล	3-4	4-5
ดาวเรือง	กลีบดอก	สารส้ม	เหลือง	4-5	4
ขี้เหล็กบ้าน	ใบแก่	-	น้ำตาล	4-5	3-4
มะพูด	เปลือกต้น	สารส้ม	เหลือง	4	4
กระถินบ้าน	เปลือกต้น	จุนสี	น้ำตาล	3-4	4-5
เพกา	เปลือกต้น	-	เหลือง	5	4-5
สัก	ใบส่วนยอด	จุนสี	เขียวขี้ม้า	5	4

หมายเหตุ : ระดับความคงทนของสีต่อแสงแดด มีค่าตั้งแต่ 1-8 โดยระดับที่ 1 มีความคงทนต่อแสงแดดต่ำสุดระดับความคงทนต่อการซัก มีค่าตั้งแต่ 1-5 โดยระดับที่ 1 มีความคงทนต่ำสุด

: ระดับความคงทนต่อแสงและการซัก ทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ศูนย์ทดสอบวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์สิ่งทอสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.8.1 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากใบเตย

2.8.1.1 ข้อมูลทั่วไปของใบเตย [35]

ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Pandanus odoratus Ridi.</i>
ชื่อวงศ์	PANDANACEAE
ชื่ออังกฤษ	Pandanus, Screw pine
ชื่อท้องถิ่น	ภาคกลาง : เตยหอมใหญ่ (Toei-hom-yai) เตยหอมเล็ก (Toei-hom-lek) มลายู : ปาเนาะวอจิง (Pa-nae-wo-ninging)
ถิ่นกำเนิด	ไทย มาเลเซีย
รูปลักษณะ	เตยเป็นไม้น้ำ ต้นเล็กใบยาวแยกออกจากโคนต้น ใบเขียวเกลี้ยงไม่มี หนามริมใบ มีกลิ่นหอมมันๆ ต้นแก่มีรากอากาศขึ้นอยู่ตามชายคลองที่น้ำ ขุ่นลงถึง
สารให้สีหลัก	คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)



รูปที่ 2.16 ใบเตย [35]

2.8.1.2 สารให้สีที่ได้จากใบเตย

คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) [36]

คลอโรฟิลล์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีสีเขียวที่พบอยู่ในพืช โดยเฉพาะผักใบเขียวและผลไม้ดิบบางชนิด คลอโรฟิลล์มีหน้าที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งเป็นกระบวนการที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของพืช

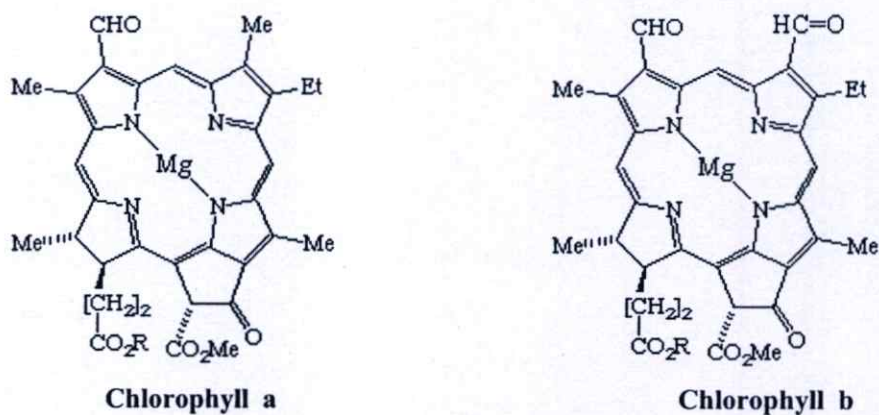
คลอโรฟิลล์ที่พบในพืชมี 2 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์เอ (มีสีเขียวแกมน้ำเงินพบในพืชชั้นสูงทุกชนิดที่สังเคราะห์แสงได้) และคลอโรฟิลล์บี (มีสีเขียวแกมเหลือง พบในพืชชั้นสูงทุกชนิดและสาหร่ายสีเขียว (Green algae)) และยังมีคลอโรฟิลล์อีก 2 ชนิดที่พบในแบคทีเรียและสาหร่าย เช่น คลอโรฟิลล์ซีและคลอโรฟิลล์ดี สำหรับคลอโรฟิลล์ที่พบในพืชสีเขียวชั้นสูงจะมีอัตราส่วนของ

คลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีประมาณ 3:1 และพบอยู่ในพลาสติด เรียกว่า คลอโรพลาสต์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กๆ เรียกว่า กรานา (Grana) และโครงสร้างของกรานาจะประกอบด้วยลามลลา (Lamellae) โดยมีคลอโรฟิลล์โมเลกุลฝังตัวอยู่ที่ลามลลาและเกาะตัวอยู่กับลิพิด โปรตีน และไลโปโปรตีน

คลอโรฟิลล์เอมีสูตรโครงสร้างเป็นเตตระไพโรล ซึ่งวงแหวนพอร์ไฟรินอยู่ในรูปไอโซโครและมีแมกนีเซียมอะตอมอยู่ตรงกลางโมเลกุล มีหมู่เมทิลที่ตำแหน่ง 1 3 5 และ 8 มีหมู่ไวนิล (Vinyl) ที่ตำแหน่ง 2 หมู่เอทิลที่ตำแหน่ง 4 หมู่โพรพิโอเนต (Propionate) ที่ตำแหน่ง 7 ถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยไฟติลแอลกอฮอล์ (Phytyl alcohol) และมีหมู่คาร์โบเมทอกซี (Carbomethoxy) ที่ตำแหน่ง 10 ทำให้คลอโรฟิลล์เอมีสูตรโมเลกุล $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ ดังแสดงในรูปที่ 2.17

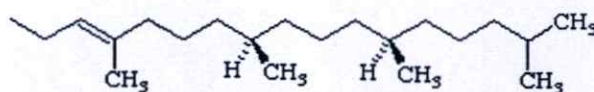
คลอโรฟิลล์บีมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายคลอโรฟิลล์เอมากยกเว้นที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งในคลอโรฟิลล์เอเป็นหมู่เมทิล แต่คลอโรฟิลล์บีเป็นหมู่ฟอร์มิล (Formyl) และมีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$ ดังแสดงในรูปที่ 2.17

ในระหว่างกระบวนการแปรรูปพืชผักที่มีสีเขียวโดยใช้ความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา Pheophytinization คือ แมกนีเซียมไอออนจะถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนอะตอมทำให้คลอโรฟิลล์ถูกเปลี่ยนเป็นฟีโอไฟติน (Pheophytin) ซึ่งเป็นการสูญเสียแร่ธาตุแมกนีเซียมออกไปจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ สีเขียวของพืชจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวมะกอก (Olive-brown) ของฟีโอไฟติน



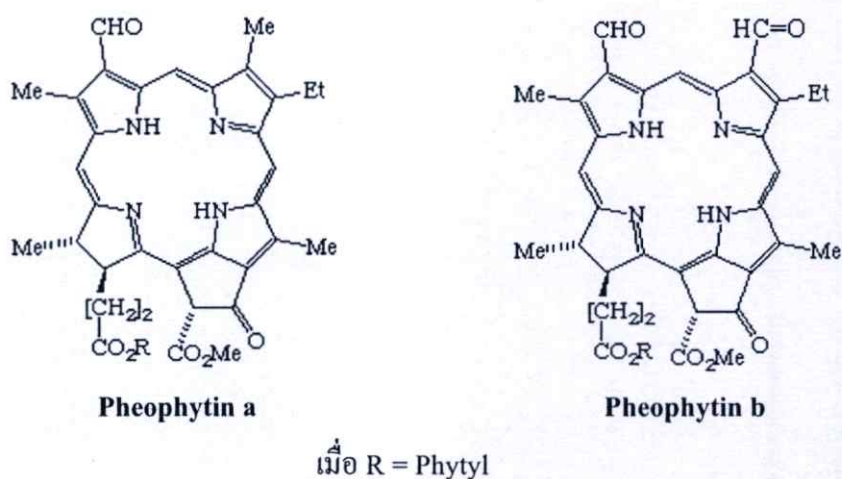
เมื่อ R = Phytyl

รูปที่ 2.17 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี [36]



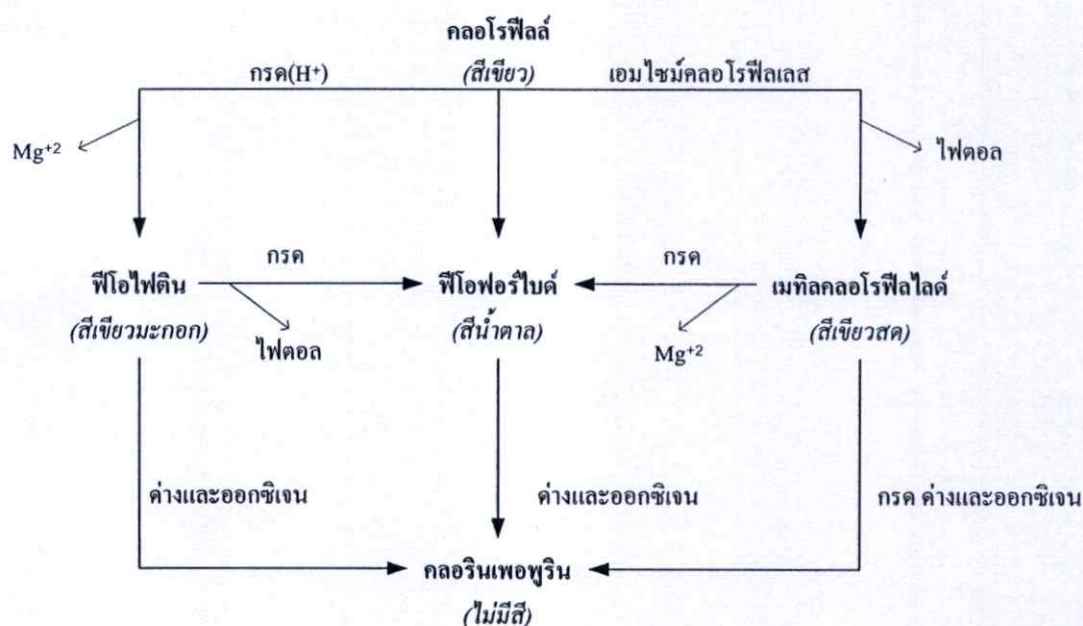
หมู่ Phytyl

รูปที่ 2.18 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของหมู่ไฟติล [36]



รูปที่ 2.19 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของฟีโอฟิตินเอและฟีโอฟิตินบี [36]

นอกจากนั้นคลอโรฟิลล์ยังอาจเปลี่ยนเป็นคลอโรฟิลไลด์ (Chlorophyllide) ได้โดยอาศัยเอนไซม์คลอโรฟิลเลส เกิดการสูญเสียหมู่ไฟติลออกไปจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ทำให้คลอโรฟิลไลด์ละลายในน้ำได้ดีกว่าคลอโรฟิลล์ แผนภูมิการสลายตัวของคลอโรฟิลล์มีดังนี้



คลอโรฟิลล์เอและฟีโอฟิตินเอไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ อีเทอร์ เบนซีน และอะซิโตน ถ้าสารทั้งสองเป็นสารบริสุทธิ์จะละลายได้เล็กน้อยในปิโตรเลียมอีเทอร์

คลอโรฟิลล์บีและฟีโอไฟตินบีละลายในแอลกอฮอล์ อีเทอร์ อะซิโตนและเบนซิน ถ้าเป็นสารบริสุทธิ์จะไม่ละลายในน้ำและปิโตรเลียมอีเทอร์ สำหรับคลอโรฟิลล์และฟีโอฟอร์ไบด์ซึ่งไม่มีหมู่ไฟตอลจะละลายได้ในน้ำแต่ไม่ละลายในน้ำมัน

ในธรรมชาติคลอโรฟิลล์จะสลายตัวหายไปเมื่อใบไม้แก่และเริ่มร่วงหล่น ทำให้ใบไม้เปลี่ยนเป็นสีเหลือง เช่นเดียวกับผลไม้บางชนิดขณะที่ผลดิบมีสีเขียวและเมื่อผลไม้เริ่มสุกสีเขียวของคลอโรฟิลล์จะค่อยๆ สลายตัวจางหายไปและมีการสังเคราะห์สีเหลืองและสีแดงของแคโรทีนอยด์หรือแอนโทไซยานินขึ้นมาแทนที่

การสลายตัวของคลอโรฟิลล์เนื่องจากแสงเมื่อคลอโรฟิลล์ถูกแสงและออกซิเจนสีจะจางลงและทำให้คืนกลับไม่ได้ไม่ว่าจะอยู่ในใบพืชหรืออยู่ในสารละลายและคลอโรฟิลล์จะสลายตัวได้รวดเร็วกว่าคลอโรฟิลล์บี

2.8.2 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากใบขี้เหล็ก

2.8.2.1 ข้อมูลทั่วไปของใบขี้เหล็ก [37-38]

ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Cassia siamea</i> Lamk.
ชื่อวงศ์	Caesalpiniaceae
ชื่อพ้อง	<i>Cassia florida</i> Vahl. <i>Cassia siamea</i> Lam.
ชื่ออังกฤษ	Cassod tree, Siamese senna, Thai copper pod, Siamese cassia
ชื่อท้องถิ่น	ขี้เหล็กแก่น ขี้เหล็กบ้าน ขี้เหล็กหลวง ขี้เหล็กใหญ่ ผักจืด แมะขี้เหล็กพะ โคะและชะหา
สารให้สี	บาราคอล (Barakol) [38]



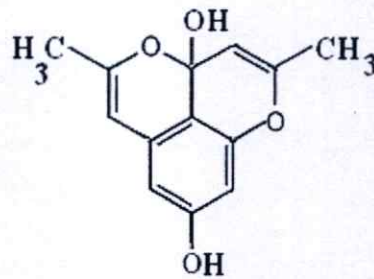
รูปที่ 2.21 ใบขี้เหล็ก [37]

2.8.2.2 สารให้สีที่ได้จากใบจี้เหล็ก

บาราคอล (Barakol) [38-43]

บาราคอลเป็นสารประกอบที่ว่องไว (Active) ที่สกัดได้จากใบและดอกของพืชที่มีชื่อว่า *Cassia siamea* โดยบาราคอลเป็นองค์ประกอบหลักของ *Cassia siamea* Lamk. [38] ซึ่งมีการปลูกกันอย่างกว้างขวางในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมทั้งประเทศไทย โดยมีรายงานการวิจัยที่ศึกษาถึงโครงสร้างทางเคมีและสมบัติของสารประกอบนี้ตั้งแต่ที่ถูกสกัดได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1969 สารประกอบนี้ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการอย่างหลากหลายเพื่อหาสมบัติทางเภสัชวิทยาเพื่อใช้ในการอ้างอิงสำหรับการใช้ในทางคลินิกเพื่อเป็นยาแพทย์แผนไทยโบราณ

ใบจี้เหล็กมีหลายชนิดและมีการปลูกกันอย่างกว้างขวางในภูมิภาคแบบร้อนและนำมาใช้เป็นยาแผนโบราณโดยชาวพื้นเมืองมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว โดยองค์ประกอบที่มีความว่องไวที่สกัดได้จากใบและดอกมีชื่อว่า “บาราคอล” ซึ่งในการสกัดเป็นครั้งแรกได้มีการระบุว่าเป็น 3a, 4-dihydro-3a, 8-dihydroxy-2, 5-dimethyl-1, 4-dioxaphenalene โดย Hassanali-Walji และคณะในปี ค.ศ. 1969 [43] ซึ่งบาราคอลประกอบไปด้วยโครงสร้างที่เป็น Tricyclic ring ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 สูตรโครงสร้างของบาราคอล [39]

ตารางที่ 2.14 สมบัติทางเคมีพื้นฐานของบาราคอล [39]

สมบัติ	Barakol
สูตร (Formula)	$C_{13}H_{12}O_4$
น้ำหนักโมเลกุล (MW)	232
สี (Colour)	Greenish yellow
จุดเดือด (Melting point)	166-170° C

2.8.3 การย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากกามมะพร้าวแห้ง

2.8.3.1 ข้อมูลทั่วไปของกามมะพร้าวแห้ง [30, 44]

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera* Linn.

ชื่อวงศ์ ARECACEAE (PALMAE)

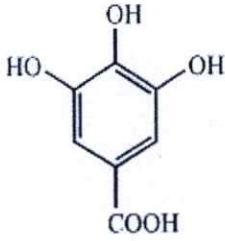
ชื่ออังกฤษ	Coconut, Coconut palm, Coco palm
ชื่อท้องถิ่น	คอส่า คุง โพล มะพร้าว ย่อ หมากอูน หมากอูน หมากอูน และ โคง
สารให้สี	แทนนิน (Tannins) หรือสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) [45]
ถิ่นกำเนิด	เป็นต้นไม้ตระกูลปาล์ม (Plam) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มะพร้าวมีอยู่หลายชนิด เจริญได้ดีในแถบร้อนที่มีฝนตกชุก แทบทุกส่วนของมะพร้าวมีประโยชน์ต่อมนุษย์
ประโยชน์ด้านอื่นๆ	เนื้อของมะพร้าวอ่อนใช้รับประทานและนำไปใช้เป็นเครื่องดื่ม เนื้อมะพร้าวแก่ใช้เป็นอาหาร น้ำมันที่สกัดได้ใช้ในการทำครีวและทำสบู่ กากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันใช้เป็นอาหารสัตว์ เส้นใยที่ได้จากเปลือกผลนำมาทำเป็นเชือก พรหมได้ ลำต้นและใบใช้ในการสร้างบ้าน เครื่องเรือน น้ำหวานที่ปาดจากจั่นใช้ทำน้ำตาล น้ำส้ม น้ำตาลเมา ไม้ใช้ทำฟืน เผาถ่าน และทำเฟอร์นิเจอร์

2. 8.3.2 สารให้สีที่ได้จากาบมะพร้าวแห้ง

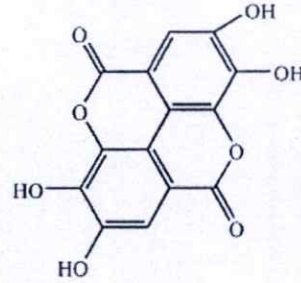
แทนนิน (Tannins) [46]

แทนนินเป็นสารจำพวกพอลิฟีนอล (Polyphenol) ที่มีความสลับซับซ้อนมากและมีอยู่แพร่หลายในอาณาจักรพืช เกือบจะทุกวงศ์ของพืชมีแทนนิน พืชที่มีแทนนินในปริมาณมากพอสมควรมักจะมีการสะสมเฉพาะแห่ง เช่น ที่ใบ ผล ลำต้นและเปลือกของไม้ยืนต้น แทนนินพบมากในใบชา โกโก้ และผลไม้ดิบบางชนิดที่มีรสฝาด ได้แก่ พลับ ละครูด กัลยง อุ่น ท้อ แอปเปิล และสาลี่ แทนนินเป็นสารที่ทำให้เกิดรสฝาด (Astringency) และมีสีเหลืองจนถึงน้ำตาล นอกจากนั้นยังทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ด้วย แทนนินสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. แทนนินที่ไฮโดรไลซ์ได้ (Hydrolyzable tannins) เป็นสาร Amorphous มีสีน้ำตาลนวล เป็นเอสเทอร์ (Ester) ของสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) จำพวกกรดแกลลิก (Gallic acid) และกรดเอลลาจิก (Ellagic acid) กับน้ำตาล โดยน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) จะเป็น Central core และหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลนี้บางส่วนหรือทั้งหมดจะทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) กับกรดแกลลิกได้แกลโลแทนนิน (Gallotannins) และกับกรดเอลลาจิกได้เอลลาจิทแทนนิน (Ellagitannins)



กรดแกลลิก (Gallic acid)

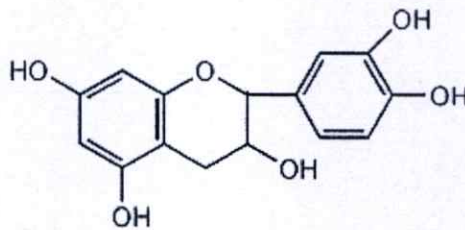


กรดเอลลาจิก (Ellagic acid)

รูปที่ 2.23 สูตรโครงสร้างของกรดแกลลิกและกรดเอลลาจิก [46]

แทนนินที่ไฮโดรไลซ์ได้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรดหรือเบสอ่อนได้คาร์โบไฮเดรตและสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic acid) นอกจากนี้ยังสามารถไฮโดรไลซ์ได้ด้วยน้ำร้อนหรือเอนไซม์ ซึ่งจะได้อิเล็กตรอนของน้ำตาลและสารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิก (Phenolic carboxylic acid)

2. แทนนินที่ไฮโดรไลซ์ไม่ได้หรือ Proanthocyanidins หรือ Condensed tannins หมายถึง โอลิโกเมอร์หรือพอลิเมอร์ของหน่วยฟลาโวนอยด์ (Flavonoid units) ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่ของ Flavan-3-ol unit หรือฟลาวานอล (Flavanol) ได้แก่ เคทีชิน (Catechin) ดังนั้นแทนนินในกลุ่มนี้จึงเป็นกลุ่มของสารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของเคทีชิน แทนนินในกลุ่มนี้ไม่ละลายน้ำ เมื่อต้มกับกรดให้ตะกอนสีแดงเรียกว่า Phlobaphene หรือ Tannin-red ตัวอย่างแทนนินในกลุ่มนี้ได้แก่ Proanthocyanidins ที่ประกอบด้วยเคทีชินเชื่อมต่อกัน 3 หน่วย มีชื่อเรียกว่า “Procyanidin C2”



รูปที่ 2.24 สูตรโครงสร้างของเคทีชิน (Catechin) [46]

เคทีชินเป็นฟลาวานอลทั่วไป ซึ่งเกิดในพืชหลายชนิด พบได้ในชาเขียว ผงสีน้ำตาล ไวน์แดง ต้นฮอร์ธอน และพืชอื่นๆ Proanthocyanidins อาจประกอบด้วยหน่วยของฟลาวานอลได้ตั้งแต่ 2-50 หน่วย หรือมากกว่านั้น ดังนั้นการละลายของ Proanthocyanidins นี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและระดับของการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ทำให้สามารถละลายได้หรือไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

ตารางที่ 2.15 ชนิดและคุณลักษณะของรงควัตถุที่ได้จากธรรมชาติ [36]

รงควัตถุ	จำนวนสารประกอบ (ชนิด)	สี	แหล่งที่พบ	การละลาย	ความคงตัว
แอนโทไซยานิน	120	ส้ม แดง น้ำเงิน	พืช	ละลายในน้ำ	ไวต่อการเปลี่ยนพีเอชและความร้อน
ฟลาโวนอยด์	600	ไม่มีสีเหลือง	พืช	ละลายในน้ำ	คงตัวต่อความร้อนเล็กน้อย
ลูโคแอนโทไซยานิน	20	ไม่มีสี	พืช	ละลายในน้ำ	คงตัวต่อความร้อน
แทนนิน	20	ไม่มีสีเหลือง	พืช	ละลายในน้ำ	คงตัวต่อความร้อน
บีตาเลน	70	เหลืองแดง	พืช	ละลายในน้ำ	ไวต่อความร้อน
ควิโนน	200	เหลืองถึงดำ	พืช สาหร่าย แบคทีเรีย	ละลายในน้ำ	คงตัวต่อความร้อน
แซนโทน	20	เหลือง	พืช	ละลายในน้ำ	คงตัวต่อความร้อน
แคโรทีนอยด์	300	ไม่มีสีแดง เหลือง	พืช สัตว์	ละลายในน้ำมัน	คงตัวต่อความร้อน
คลอโรฟิลล์	25	เขียว น้ำตาล	พืช	ละลายในน้ำและน้ำมัน	ไวต่อความร้อน
ฮีม	6	แดง น้ำตาล	สัตว์	ละลายในน้ำ	ไวต่อความร้อน

2.9 เทคนิคการย้อมสีสิ่งทอด้วยวัสดุจากธรรมชาติ [30]

การย้อมวัสดุสิ่งทอด้วยสีย้อมธรรมชาติ ในสเกลขนาดเล็กระดับครอบครัวมีความแตกต่างจากการย้อมสีเคมีในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มาก เนื่องจากตัววัสดุสิ่งทอซึ่งไม่สามารถกำหนดคุณภาพได้ สีจากวัสดุธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงง่าย ทั้งเนื่องมาจากแหล่งปลูกและสภาพอากาศการย้อมให้ได้ผลดีและมีความสม่ำเสมอจึงต้องอาศัยประสบการณ์และความช่างสังเกตของผู้ย้อมมาก

ในการข้อมวัสดุสิ่งทอนั้นก่อนข้อมควรมีการทำความสะดวกก่อนเสมอเพื่อเป็นการช่วยให้สีเข้าไปติดได้ดีขึ้น การทำความสะอาดไม่ว่าจะใช้สบู่ น้ำยาฟอกสี หรือสบู่เทียม ควรจะล้างสารเหล่านี้ ออกให้หมด เพราะถ้าล้างไม่หมด เมื่อนำไปข้อม สีจะไม่สามารถเข้าไปเกาะติดในเส้นใยได้ดีพอ

เมื่อทำความสะอาดเส้นใยแล้วไม่ควรนำไปข้อมต่อทันที ควรผึ่งให้แห้งและเก็บในที่มิดชิด ไม่มีฝุ่น ความชื้นหรือสิ่งสกปรกต่างๆ เพราะสิ่งเหล่านี้อาจไปเกาะติดเส้นใยอีกครั้ง ทำให้เส้นใยสกปรก และอาจขึ้นราได้ ซึ่งจะขัดขวางการติดสีของสีข้อม

การข้อมสีจากเปลือกไม้ พันธุ์ไม้ที่สามารถนำเอาเปลือกมาใช้ในการข้อมสีเส้นใยไหมคุณภาพดี มีหลายชนิด ได้แก่ สะเดา กระจดิน ตะแบก เพกา มะพูด ฯลฯ วัตถุประสงค์ที่มีลักษณะแข็ง เช่น เปลือกไม้ แก่นไม้ หรือกิ่งไม้พวกนี้ควรจะสับเป็นชิ้นเล็กๆ ก่อน แล้วแช่น้ำไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง แต่ถ้าเป็น เปลือกหรือส่วนที่แข็งมากๆ การแช่น้ำทิ้งไว้ข้ามคืนจะดีกว่า เพราะจะทำให้การสกัดสีทำได้ง่ายและ ได้สีที่เข้มขึ้น สำหรับใบไม้้นั้นควรฉีกเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วแช่น้ำไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง เช่นกัน แล้วจึง ค่อยนำไปต้ม การข้อมเส้นใยไหมจากใบ ส่วนของใบพืชหลายชนิดที่สามารถนำมาข้อมสีเส้นใย ไหมได้สีที่มีคุณภาพดี ได้แก่ สบู่แดง (สบู่เลือด) แก้วมะกอก โอลีฟ ชี้เหล็ก สมอไทย คราม ฯลฯ ข้อดีของการใช้ใบเป็นวัตถุดิบในการข้อม เนื่องจากหาได้ง่ายและมีปริมาณมากใช้ได้ตลอดปี นอกจากนี้ยังสามารถที่จะพัฒนาไปสู่กระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม แปรรูปได้

ในกรณีการข้อมสีเขียว สีเขียวส่วนใหญ่จะได้จากใบไม้ที่มีสีเขียว ถ้าเป็นไปได้ในการสกัดสี ควรใช้ใบไม้สดดีกว่า เพราะจะให้สีเขียวมากกว่า แต่เพื่อความสะดวกใบแห้งก็สามารถใช้ได้แต่ควร ใช้ใบแห้งที่มาจากการเก็บใบสดจากต้นมาผึ่งลมให้แห้ง ไม่ควรเก็บใบแก่ที่ตกจากต้นหรือยังคาต้น อยู่ เพราะสารที่ให้สีเขียวมีน้อยมาก ทำให้การข้อมไม่ได้สีเขียว นอกจากนี้คุณสมบัติของใบอ่อน และใบแก่จะแตกต่างกัน และจะให้เฉดสีที่แตกต่างกันด้วย เช่น ใบของสบู่แดง (สบู่เลือด) ควรใช้ ใบส่วนยอดที่เป็นสีแดง จะให้สีได้ดีกว่าส่วนที่เป็นสีเขียว ส่วนใบแก้วและมะกอกโอลีฟใช้ใบที่ไม่ อ่อนหรือแก่จนเกินไป สักใช้ใบอ่อน

การข้อมเส้นใยไหมจากส่วนของผล การใช้ผลจากพืชเป็นวัตถุดิบในการข้อมสีเส้นใยไหมให้ได้ คุณภาพดีมีหลายชนิด พืชที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น ผลมะเกลือที่ข้อมให้สีดำ แต่ยังมีผลหรือเปลือกของ ผลมังคุดและเปลือกของเงาะ โรงเรียนที่สามารถข้อมสีได้ดีเช่นกัน ข้อดีของการใช้ผลเป็นวัตถุดิบ คือ ไม่เป็นการทำลายต้นไม้เหมือนกับการใช้เปลือกหรือแก่น สามารถพัฒนากรรมวิธีในการเพิ่ม ผลผลิตได้เหมือน ไม้ผลทั่วไปและสามารถพัฒนาแปรรูปเพื่อใช้ในการข้อมแบบอุตสาหกรรม ข้อเสียคือ ผลไม้ส่วนใหญ่จะออกเป็นฤดูกาล ทำให้ไม่สามารถนำมาข้อมได้ตลอดปี จำเป็นต้องพัฒนา กระบวนการผลิตและแปรรูปเพื่อให้สามารถข้อมได้ตลอดเวลา

วิธีการสกัดสีจากผลของพืชชนิดต่างๆ จะแตกต่างกัน เช่น ผลของมะเกลือ และสีฟีนคทาควร ใช้ผลอ่อน กระบกและหว้าจะใช้ผลแก่

เมื่อเตรียมเส้นใยและน้ำย้อมแล้ว ก่อนที่จะนำเส้นใยลงย้อม ควรนำเส้นใยมาชุบน้ำแล้วบิดให้หมาดก่อนย้อมทุกครั้ง เพราะจะทำให้เส้นใยสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีและเร็วขึ้น และทำให้สีไปติดที่เส้นใยได้ง่ายขึ้น

สำหรับเรื่องการย้อมสีนั้นควรค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิของน้ำย้อม เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการจึงใส่เส้นใยลงไปย้อม นอกจากนี้กรรมที่ย้อมและต้องต้มเดือดนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ไฟแรงจนกระทั่งทำให้น้ำย้อมเดือดมากๆ แค่อุ่นๆ ก็สามารถย้อมได้แล้ว เนื่องจากการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิสูงมากๆ ก็ไม่สามารถทำให้สีย้อมเข้าไปติดในเส้นใยได้มากขึ้นกว่าเดิม ซ้ำยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย

เวลาในการย้อมก็เป็นสิ่งสำคัญ ไม่ควรใช้เวลาย้อมน้อยเกินไปเพราะสีย้อมจะยังไม่สามารถเกาะเส้นใยได้ดี เมื่อนำไปซักก็จะหลุดหมดในทางตรงกันข้าม การย้อมที่นานเกินไปก็จะเสียเวลาและพลังงานเพราะสีย้อมก็ไม่สามารถเข้าไปเกาะติดเส้นใยได้มากกว่าขีดจำกัดของมันแล้ว

สิ่งที่สำคัญในขั้นตอนการย้อม คือ ต้องมีการกวนอยู่สม่ำเสมอ และมีการพลิกเส้นใยบ่อยๆ เพราะสิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยให้สีสามารถกระจายตัวได้ดี และแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ทุกส่วน และยังจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยด่างอีกด้วย ซึ่งควรจะมีการกวนและการพลิกเส้นใย ทั้งกรณีการย้อมร้อนและย้อมเย็น

ในขณะที่ย้อม ถ้าน้ำแห้งก็ควรมีการเติมน้ำเพื่อรักษาระดับของน้ำให้สม่ำเสมอ เพื่อให้เส้นใยทุกส่วนจมน้ำไม่มีส่วนที่พื้นน้ำย้อมออกมาซึ่งจะทำให้สีย้อมติดไม่เท่ากัน เพื่อความสะดวกในการกวนก่อนย้อมจึงควรคิดถึงปริมาณของเส้นใยและความจุของหม้อให้เหมาะสมกัน

เมื่อย้อมเสร็จ เส้นใยที่ย้อมแล้วควรจะมีสิ่งไว้สักครู่หรือตากให้แห้งเลยก็ได้ แล้วจึงนำมาซักจะทำให้สีหลุดน้อยกว่าการซักทันทีหลังจากย้อมเสร็จ การตากส่วนใหญ่ควรตากในที่ร่มและมีลมพัดผ่านตลอด แต่สำหรับการย้อมสีบางอย่าง เช่น การย้อมด้วยน้ำย้อมจากผลมะเกลือ ควรนำไปตากกลางแจ้ง เพราะจะให้สีที่เข้มขึ้น

สำหรับการย้อมด้วยมอร์แดนท์ไม่ว่าจะเป็นการย้อมมอร์แดนท์ก่อน หรือหลังย้อมสี โดยเฉพาะการย้อมมอร์แดนท์ก่อนและหลังย้อมสี ควรค้มน้ำมอร์แดนท์แค่อุ่นก็พอ และนอกจากนี้การใช้มอร์แดนท์เหล็ก ควรจะมีการคนบ่อยกว่ามอร์แดนท์ชนิดอื่นๆ มิฉะนั้นจะทำให้เหล็กไปติดเส้นใยเป็นรอยด่างทำให้ได้สีที่ไม่เสมอกัน

เส้นใยที่ย้อมเสร็จแล้ว ถ้ามีรอยด่างเนื่องจากสีติดไม่เสมอกันสามารถแก้ไขได้โดยการนำไปย้อมซ้ำ เพราะเส้นใยที่ย้อมสีธรรมชาติแล้วนั้นสามารถย้อมซ้ำได้อีกระหว่างย้อมควรจะมีหมั่นกวนบ่อยๆ ซึ่งจะสามารถทำให้รอยด่างๆ จางหายไปเพราะสีธรรมชาติไม่ติดแน่นเท่าสีสังเคราะห์

น้ำย้อมที่ย้อมแล้ว บางชนิดสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ เช่น ใบสะเดา ใบหญ้าหวาน เป็นต้น แต่จะให้ผลสีที่ต่างกันไป

นอกจากนี้เส้นใยที่ย้อมแล้วสามารถนำกลับมาย้อมใหม่ได้โดยเป็นการย้อมทับการย้อมแบบนี้ ในน้ำย้อมบางอย่างจะได้สีที่เข้มขึ้น โดยเฉพาะสีดำและสีเขียว การย้อมสีธรรมชาติให้ได้สีที่มีคุณภาพดีใกล้เคียงกันของการย้อมแต่ละครั้งนั้น ต้องคำนึงถึงวัตถุดิบ อัตราส่วนที่ใช้ pH ของน้ำย้อม และชนิดของมอร์แดนที่จะต้องใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

เมื่อได้เส้นใยที่ย้อมแล้วควรมีการเก็บชิ้นงานไว้ส่วนหนึ่งเพื่อเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบเพราะเมื่อนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น ลงแป้ง สีของเส้นใยหรือผ้าจะเปลี่ยนไป การเก็บตัวอย่างไว้จะสามารถทำให้เอาไว้เปรียบเทียบได้ เมื่อทำครั้งต่อไปก็จะทำให้การย้อมได้สีเดิมหรือใกล้เคียงสีเดิม ไม่เกิดปัญหาในการขายสินค้าอีกด้วย

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กุลชล บุญสวัสดิ์ [1] ทำการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย้อมติดสีของเส้นใยไหมด้วยวิธีการต่อกิ่งกับ HEMA และ MMA พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง (% weight gain) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนและเวลาที่ใช้ในการต่อกิ่งเพิ่มขึ้น โดยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มี % weight gain มากกว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA ส่วนสมบัติเชิงกลของไหมต่อกิ่งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยแต่พบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความสามารถในการดูดซับความชื้นดีกว่า มีความคงทนต่อกรดและด่างสูงกว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA และในส่วนของสมบัติการย้อมติดสีพบว่าเมื่อย้อมด้วยสีย้อมแอซิด สีรีแอคทีฟ และสีย้อมขมื่น ไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมมากขึ้น และไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA มีความคงทนของสีต่อการซักและเหงื่อสูงขึ้นแต่เมื่อย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟมีความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับเดียวกับไหมลอกขาว นอกจากนี้ไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมสังเคราะห์มีความคงทนของสีต่อแสงดีกว่าการย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติ

จิราธร บุญญา [2] ทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย้อมติดสีของเส้นใยไหมด้วยวิธีการต่อกิ่งกับ HEMA และ Silane A-172 พบว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มี % weight gain เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและเวลาเพิ่มขึ้น และไหมที่ต่อกิ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น โดยไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA แต่ไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความชื้นรีเทนที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ไหมที่ต่อกิ่งมีความคงทนต่อกรดสูงขึ้นส่วนความสามารถในการย้อมติดสีเมื่อย้อมด้วยสีย้อมขมื่นและครั้งพบว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความสามารถในการย้อมติดสีบนเส้นใยสูงขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับไหมที่ต่อกิ่งด้วย Silane A-172 และไหมที่ต่อกิ่งมีความคงทนของสีต่อการซักเพิ่มขึ้นแต่ความคงทนของสีต่อแสงและเหงื่อไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้พบว่าไหมต่อกิ่งเมื่อย้อมด้วยสีย้อมครั้งมีระดับความคงทนของสีต่อการซัก

ต่ำกว่าเมื่อข้อมด้วยสีข้อมขมมันแต่เมื่อข้อมด้วยสีข้อมขมมันมีความคงทนของสีต่อแสงสูงกว่าเมื่อข้อมด้วยสีข้อมครั้ง

M. Tsukada และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและ โครงสร้างของเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย MMA และศึกษาสมบัติทางความร้อนของไหมที่มีเปอร์เซ็นต์การต่อกึ่ง 30% โดยใช้เทคนิค DSC พบว่ามีพีคเอนโดเทอร์มิก (Endothermic) 2 ส่วน โดยเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 326° C และในช่วง 390-410° C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบเบต้าและPMMA ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งตามลำดับ ในขณะที่การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดยเทคนิค TGA พบว่าไหมที่นำมาต่อกึ่งกับมอนอเมอร์ชนิดนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น และการศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยไหมโดยใช้เทคนิค XRD พบว่ามอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งนี้ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างที่เป็นผลึกของเส้นใยไหม

ศันศินีย์ คำบุญชู และคณะ [45] วิจัยการข้อมเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีน้ำตาลจากวัชพรรณชาติจากพืช 4 ชนิด คือ สะเดา กาบมะพร้าวแห้ง ใบหูกวาง และใบยูคาลิปตัส ในการวิจัยได้มีการศึกษาทางเคมีสถานะที่เหมาะสมต่อการข้อม ผลของสารช่วยข้อมหรือมอร์แดนท์โลหะที่มีต่อสีที่ข้อมและความคงทนของสีต่อแสง การวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าสีน้ำตาลจากพืชเหล่านี้เกิดจากสารเคมีจำพวกแทนนินและสารฟีนอลิกที่มีในพืช อุณหภูมิที่เหมาะสมในการข้อมอยู่ในช่วง 65-85° C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และการข้อมส่วนมากสามารถข้อมติดได้โดยไม่ต้องใช้โลหะมอร์แดนท์แต่สีจากพืชบางชนิดไม่ทนต่อแสง การใช้โลหะมอร์แดนท์ทำให้เจดสีเปลี่ยนไปและอาจช่วยให้ความคงทนต่อแสงดีขึ้น โลหะมอร์แดนท์ที่ใช้ คือ สารส้มและจุนสี อย่างไรก็ตามพบว่าชนิดของพืช ส่วนประกอบทางเคมี ภาวะการข้อม และชนิดของโลหะมอร์แดนท์ที่แตกต่างกันทำให้ได้สีน้ำตาลที่มีเจดสี ความคงทนต่อการซัก และความคงทนต่อแสงต่างกัน

อนันต์แสวก เห่าซึ่งเจริญ และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาการข้อมด้ายฝ้ายด้วยสีข้อมธรรมชาติจากใบหญ้าหวาน ใบดิวแดง ใบสาบเสือ ใบจามจุรี และใบจี้เหล็กฝรั่ง เพื่อให้ได้สีเขียวโดยใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำต่อด้ายคงที่ที่ 1: 10 : 1 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ชนิดของมอร์แดนท์โลหะ ความเข้มข้น และวิธีการข้อมมอร์แดนท์ โดยนำด้ายที่ข้อมแล้วไปทำการวัดสีตามระบบ CIELAB ทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก และแสง พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการข้อมสีเขียว คือ ที่อุณหภูมิระหว่าง 70-80° C เป็นเวลา 60 นาที แล้วทำการข้อมมอร์แดนท์ทองแดงความเข้มข้น 0.25-1% ของน้ำหนักด้ายที่อุณหภูมิ 40-50° C เป็นเวลา 30 นาที ความคงทนต่อการซักนั้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงสีอยู่ในระดับพอใช้ถึงดีเทียบเท่าสเกลเทา 2 ถึง 4 การเปื้อนติดสีดีถึงดีมากเทียบเท่าสเกลเทา 4 ถึง 5 และความคงทนต่อแสงต่ำถึงปานกลางเทียบเท่าผ้าขนสัตว์มาตรฐานเบอร์ 1-2 ถึง 3-4

ลลิตา บุญโถม [48] ทำการศึกษาการลอกกาวยเส้นใยไหมด้วยสารเคมีต่างๆ ได้แก่ กรดทาร์ทริก โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนตและไตรเอทิลเอมีน ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นสามารถลอกกาวยได้ดีขึ้นและไหมที่ผ่านการลอกกาวยด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด นอกจากนี้ศึกษาการต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วย MAA และ MMA ที่อัตราส่วนระหว่าง MAA และ MMA ต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิและช่วงเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าไหมที่ต่อกิ่งมีปริมาณพอลิเมอร์บนเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการต่อกิ่งมากขึ้นและการต่อกิ่งด้วย MAA ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที ให้สมบัติเชิงกลและลักษณะของเส้นใยดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA และ MAA ผสม MMA มีพื้นผิวที่ขรุขระเนื่องจากโอลิโกเมอร์ของ MMA บนเส้นใยแต่เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบขึ้น สุกท้ายเมื่อนำไหมต่อกิ่งไปย้อมด้วยสีย้อมแอซิดและสีย้อมเบสิก พบว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA มีความคงทนของสีสูงขึ้นและไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิดมีความคงทนของสีมากกว่าการย้อมด้วยสีย้อมเบสิก

วัฒนา คล้ายรัศมี [49] ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA และ MAA ในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าความสามารถในการต่อกิ่งลดลงเมื่ออัตราส่วนของเอทานอลในตัวทำละลายผสมเพิ่มขึ้นและไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA ในตัวทำละลายน้ำมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงสุด นอกจากนี้ไหมที่ต่อกิ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น และมีความคงทนต่อกรดและด่างสูงขึ้น ยกเว้นไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA ที่เปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งสูงๆ

นอกจากนี้ศึกษาสมบัติการย้อมติดสีพบว่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการดูดซับสีย้อม (Dye uptake) มีค่าเพิ่มขึ้นไปตามเปอร์เซ็นต์ของ PMMA หรือ PMAA ที่เพิ่มขึ้นในโครงสร้างของไฟโบรอินของเส้นใยไหมโดยไม่ขึ้นกับชนิดของสีย้อมและความคงทนของสีต่อการซักของไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA และ MAA ที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิด เบสิก และสีย้อมขมื่น พบว่ามีสมบัติที่ดีขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับไหมลอกกาวยและความคงทนของสีต่อเชื้อเมื่อย้อมด้วยสีย้อมแอซิดและเบสิกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงเมื่อย้อมด้วยสีย้อมขมื่น

H. Zhang [50] ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นใยไหมพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ด้วยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) และเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) จากนั้นวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) และศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าเมื่อผ่านการให้ความร้อนแก่ไหมที่อุณหภูมิตั้งแต่ $25-550^{\circ}\text{C}$ มีเพียง 1% ของน้ำหนักไหมดิบเท่านั้นที่หลงเหลือเป็นเถ้าและเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบอนินทรีย์ที่อยู่ในเถ้านี้พบว่ามีแคลเซียม

โพแทสเซียม ซัลเฟต แมกนีเซียมและอื่นๆ จากการศึกษาด้วยเทคนิค TGA พบว่าไหมมีน้ำหนักลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิประมาณ 256-280° C และจากเทคนิค DSC พบพีคเอนโดเทอร์มิก (Endothermic) ที่ 308° C ส่วนแถบการดูดกลืนจากเทคนิค FTIR พบว่ามีพีคที่ 2380 cm⁻¹ (-OH stretching) 1760 cm⁻¹ (C=O stretching) 1503 cm⁻¹ (N-H stretching) 1085 cm⁻¹ (C-N stretching) และ 965 cm⁻¹ (-NH₂ stretching) และจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ของไหมที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300° C พบว่ามีท่อขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 ไมโครเมตรอยู่บริเวณกึ่งกลางของเส้นใยไหม

M.L. Gulrajani และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาการลอกกาไหมเลี้ยงพันธุ์ *Bombyx mori* ด้วยกรดอินทรีย์ต่างๆ พบว่าให้ผลใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดกาไหมโดยพิจารณาจากร้อยละของน้ำหนักไหมที่สูญหายไป แต่ถ้าพิจารณาความเหนียวของเส้นใยภายหลังการลอกกาพร้อมด้วยพบว่า กรดซัคซินิก (Succinic acid) ให้ผลดีที่สุดรองลงมาได้แก่ กรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) และจากผลการวิจัยพบว่าหากลอกกาไหมด้วยกรดทาร์ทาริก สูตรที่ได้ผลดีที่สุดคือใช้กรดทาร์ทาริก 8 กรัมต่อลิตร สารช่วยเปียกไม่มีประจุ 3 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 110° C เป็นเวลา 30 นาที และ pH ประมาณ 2.3-3.5 พบว่าสามารถกำจัดกาไหมได้โดยน้ำหนักไหมสูญหายไปประมาณ 21% โดยที่ไหมมีความเรียบ สำหรับการลอกกาไหมด้วยกรดซัคซินิก อาจใช้ประมาณ 5-6 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 60 นาที (หากอุณหภูมิลดลงเวลาต้องเพิ่มขึ้น) และ pH ประมาณ 2.9-3.2 สามารถกำจัดกาไหมได้โดยน้ำหนักไหมสูญหายไปประมาณ 21% เช่นกัน

นอกจากนี้การลอกกาไหมด้วยอะลิฟาติกเอมีน (Aliphatic amines) พบว่าอะลิฟาติกเอมีนที่เหมาะสมที่สุด คือ TEA โดยที่ความเข้มข้น 0.25 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 80° C เป็นเวลา 45 นาที พบว่าสามารถลอกกาไหมได้มากกว่า 90% โดยไม่ทำลายเส้นใยไหม อีกทั้งทำให้ไหมมีความสะอาดและมีพื้นผิวที่เรียบ แต่ถ้าลอกกาที่อุณหภูมิ 95° C พบว่าไหมถูกทำลายลง

S. Chopra และคณะ [52] ได้ทำการศึกษาผลของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการลอกกาผ้าไหมมัลเบอร์รี่ (Mulberry silk fabric) ที่มีต่อความสามารถในการสัมผัส ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ สาร กรด ต่าง TEA และเอมไซม์ โดยใช้ค่าการสัมผัสของผ้าไหมที่ทำการลอกกาด้วยสบู่เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่าสารเคมีเหล่านี้ให้ประสิทธิภาพในการลอกกาใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากน้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) แต่จากการตรวจสอบด้วย SEM ที่บริเวณพื้นผิว (Interface) ของเส้นใยพบว่าผ้าไหมที่ทำการลอกกาด้วยสบู่ ต่างและ TEA มีประสิทธิภาพมากกว่าการลอกกาด้วยเอมไซม์และกรด ส่วนค่าการสัมผัสผ้าไหมมัลเบอร์รี่ที่ทำการลอกกาด้วยสบู่และต่างให้ความนุ่ม ความยืดหยุ่นและความรู้สึกเมื่อลูดีที่สุด ผ้าไหมที่ทำการลอกกาด้วยเอมไซม์มีลักษณะที่แข็งและเปราะ และผ้าไหมที่ทำการลอกกาด้วย TEA ให้ค่าการสัมผัสอยู่ในระดับกลาง

P. Jiang และคณะ [53] ทดสอบสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยไหมดิบที่ผ่านการลอกกาโดยใช้สารละลายในการลอกกาไหมแตกต่างกัน 5 ชนิด คือ น้ำกลั่น สารละลายบอร์ฟอริก (Boric acid-

sodium borate buffer) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ยูเรีย (Urea) และกรดซัคซินิก (Succinic acid) ผลของการลอกกาวยุโรปทำให้มีการลดลงของมอดูลัสยืดหยุ่นและ Proportional limit (Yield point) ทำให้เห็นว่าการลอกกาวยุโรปนั้นทำให้แรงโควาเลนต์ของเส้นใยไฟโบรอินอ่อนแอลง ซึ่งรวมถึงพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยไฟโบรอินด้วย นอกจากนี้พบว่ามีปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัยที่เกิดขึ้นพร้อมกับการลอกกาวยุโรป ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางแรงดึงของเส้นใย คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับไมโครของเส้นใยไฟโบรอินและอัตราส่วนในการลอกกาวยุโรป นอกจากนี้มีการวิเคราะห์ด้วย SEM เพื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าวิธีในการลอกกาวยุโรปที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อสัณฐานวิทยาที่ได้ ซึ่งแตกต่างกันอย่างชัดเจน

M. Tsukada และคณะ [54] ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมที่ผ่านการดองด้วย ETMA โดยใช้ APS เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60-80° C ในช่วงเวลา 0-90 นาที จากการศึกษาค้นพบว่าการเพิ่มพอลิเมอร์บนเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้นและมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 80° C เป็นเวลา 60 นาที จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบลักษณะของแผ่น (Granule) ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอของโอลิโกเมอร์ของ ETMA บนพื้นผิวของไหม ส่วนอุณหภูมิในการสลายตัวของไหมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC นอกจากนี้พบว่าสมบัติทางแรงดึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ความสามารถในการติดสีของไหมเพิ่มขึ้นมากเมื่อเกิดการดองที่เพิ่มขึ้น

M. Tsukada และคณะ [55] ทำการศึกษาเส้นใยไหมพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ที่ผ่านการดองสำเร็จทางเคมีด้วยการเอซิลเลชัน (Acylation) ของอะโรมาติกแอซิดแอนไฮไดรด์ (Aromatic acid anhydrides) 2 ชนิด คือ พทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydrides) และ OSBA พบว่า OSBA มีความว่องไวต่อไหมดีกกว่า ส่วนความชื้นรีเทนของไหมที่ผ่านการดองด้วยพทาสิกแอนไฮไดรด์มีค่าเกือบไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ตัวอย่างที่ดองด้วย OSBA มีค่าเพิ่มขึ้นไปตาม % Weight gain ที่เพิ่มขึ้นและการดองด้วย OSBA ทำให้ได้ค่า Dye uptake ของสีของไหมลดลงอย่างมากแต่เพิ่มความเข้ากันได้ของไหมต่อสีของแคทไอออนิก นอกจากนี้ไหมที่ดองด้วยพทาสิกแอนไฮไดรด์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC พบว่าให้พีคเอนโดเทอร์มิก (Endothermic) ที่อุณหภูมิประมาณ 210° C

M. Tsukada และคณะ [56] ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมที่ดองด้วย HEMA พบว่าความแข็งแรงและการดึงยึดของไหมดองทั้งในสภาวะแห้งและเปียกลดลง เมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของไหมดองในสภาวะแบบแห้งที่เปอร์เซ็นต์การดองในช่วง 0-16% เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นค่ามอดูลัสยืดหยุ่นจึงลดลงต่ำกว่าเส้นใยไหมที่ไม่ได้ดอง จากการศึกษาค้นพบโครงสร้างของไหมด้วยเทคนิค FTIR สเปกตรัมของไหมดองเกิดแถบการดูดกลืนที่เลขคลื่น 1724 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่เอสเทอร์ของ HEMA สำหรับการวัดค่าดัชนีหักเหทั้งในแนวอนและแนวตั้งฉากกับแกนของเส้นใย ปรากฏการณ์ไบฟริงก์เจนท์

(Birefringence) และดัชนีหักเหแบบไอโซทรอปิก (Isotropic refractive index) มีค่าลดลงทำให้ระดับของความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) และการจัดเรียงตัวของไหมต่อกิ่งลดลงและจากการศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของไหมด้วยเทคนิค XRD พบว่า HEMA ที่ใช้ในการต่อกิ่งไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของเส้นใยไหม ส่วนสัณฐานวิทยาของไหมที่เปอร์เซ็นต์การต่อกิ่ง 32% พบว่าผิวของเส้นใยมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอคล้ายคลึงกับไหมก่อนต่อกิ่ง นอกจากนี้ไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นด้วย

M.Tsukada และคณะ [57] ได้ทำการศึกษาเส้นใยไหมพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย VTMSi ซึ่งใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ APS ADC และ AIBN พบว่าความสามารถในการต่อกิ่งของตัวริเริ่มแต่ละชนิดไม่เท่ากันเรียงตามลำดับได้ดังนี้ คือ AIBN > APS > ADC และจากการวิเคราะห์โครงสร้างของไหมที่ต่อกิ่งด้วย VTMSi โดยใช้เทคนิค FTIR และ XRD พบว่าเกิดพอลิเมอร์ร่วมของ VTMSi ภายในเมทริกซ์ของเส้นใยและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น สำหรับความแข็งแรงดึงของเส้นใยและการดึงยืด ณ จุดขาดของเส้นใยลดลงเมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การคืนตัวจากรอยยับ ในสภาวะที่เปียกของเส้นใยดีขึ้นเมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นมากกว่า 10% ทำให้เส้นใยมีความทนทานต่อการซักมากขึ้น

นอกจากนี้ M. Tsukada และคณะ [58] ได้ทำการศึกษาการต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วยมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ MAA HEMA และ MMA โดยใช้ตัวริเริ่มที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ APS AIBN และ ADC พบว่าตัวริเริ่มแต่ละชนิดมีความสามารถในการต่อกิ่งตามลำดับดังนี้ APS > AIBN > ADC ซึ่งความเหลืองของไหมที่ผ่านการต่อกิ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของตัวริเริ่มและมอนอเมอร์ที่ใช้ โดย APS มีผลต่อความเหลืองของไหมมากที่สุด ในขณะที่การต่อกิ่งไหมด้วย MAA ทำให้เส้นใยมีความเหลืองน้อยที่สุด ส่วนความชื้นรีเทนของไหมที่ต่อกิ่งด้วย MAA พบว่ามีความชื้นเพิ่มขึ้นแต่ไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA มีความชื้นลดลง ขณะที่ความชื้นของไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากความชื้นของไหมขึ้นกับความชอบน้ำ (Hydrophilic) หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของมอนอเมอร์ ส่วนสมบัติการดึงยืดมีแนวโน้มที่ลดลงไปตาม % Weight gain ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และ MMA มีพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดไฮโดรพอลิเมอร์มาเกาะที่พื้นผิวแต่การต่อกิ่งด้วย MAA ทำให้ไหมมีพื้นผิวที่เรียบ

G. Freddi และคณะ [59] ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย MAA และ HEMA ในตัวกลางที่เป็นน้ำ และมี APS เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้สามารถเตรียมเส้นใยที่มีปริมาณพอลิเมอร์บนเส้นใยได้ถึง 300% โดยเกิดไฮโดรพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อยในระบบที่ต่อกิ่งด้วย MAA ในขณะที่มีปริมาณไฮโดรพอลิเมอร์ของ PHEMA เกิดขึ้นที่พื้นผิวของเส้นใยมากกว่า 70% และปริมาณความชื้น (Moisture content) ของไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย MAA เพิ่มขึ้นไปตามปริมาณการต่อกิ่งที่เพิ่มขึ้น แต่สภาวะในการต่อกิ่งที่รุนแรงเป็นผลทำให้เกิดการสลายตัวของไหมบางส่วน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางแรงดึงและความขาวของเส้นใยลดลง

นอกจากนี้ไหมหลังจากผ่านการต่อกิ่งก็มีความทนทานต่อการแตกหักสูงขึ้นเล็กน้อย การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงแต่อุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้น

T. K. Maji และคณะ [60] ศึกษาสมบัติเชิงกล เช่น เทนาซิตี การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส การกลับคืนตัว และการคลายความเค้นของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย MMA ที่เตรียมภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน และศึกษาความสามารถในการดูดซับความชื้นของไหมที่ผ่านการต่อกิ่งในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า การต่อกิ่งของ MMA บนเส้นใยไหมสามารถปรับปรุงสมบัติการกลับคืนตัวได้เป็นอย่างมาก โดยไม่มีผลกระทบต่อคลายความเค้นและพบว่าความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลงไปตามการเพิ่มความยาวของสายโซ่ PMMA บนเส้นใย

R. Ojah และคณะ [61] ศึกษาการนำ MMA มาต่อกิ่งกับเส้นใยไหมพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ให้เป็นพอลิเมอร์ร่วมผ่านกลไก Photopolymerization ของ MMA โดยใช้วัสดุกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor, CdS) เป็น Photocatalyst ในแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) พบว่า % การต่อกิ่งมีค่าเท่ากับ 2-10 % และมีโซโมพอลิเมอร์เท่ากับ 10-20% หลังจากนำโซโมพอลิเมอร์ออกแล้วนำเส้นใยที่ต่อกิ่งนี้มาวิเคราะห์ด้วย SEM เทคนิค DSC และนำไปศึกษาความต้านทานต่อสารเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมที่ไม่ได้ต่อกิ่ง พบว่าพื้นผิวของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งมีความไม่เรียบและไม่สม่ำเสมอ มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งมีความต้านทานต่อสารเคมีมากขึ้นแต่มีความสามารถในการเก็บรักษาความชื้น (Water retention) ลดลง

T. Arai และคณะ [62] ศึกษาการนำเส้นใยไหมและเส้นใยขนสัตว์มาเอซิลเลชัน (Acylation) ด้วยแอซิดแอนไฮไดรด์ (Acid anhydrides) 2 ชนิด คือ DDSA และ ODSA ที่อุณหภูมิ 75° C ซึ่งมีตัวทำละลาย คือ DMF หรือ DMSO พบว่า % Weight gain และหมู่เอซิล (Acyl) ที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยขนสัตว์มีมากกว่าเส้นใยไหมและสมบัติการดึงยืดของเส้นใยไหมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่เส้นใยขนสัตว์มีความสามารถในการดึงยืดที่สูงกว่า อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ % Weight gain สูงๆ นอกจากนี้ความชื้นรีเทนและความสามารถในการเก็บรักษาความชื้น (Water retention) ของเส้นใยทั้ง 2 ลดลงอย่างมากแต่สมบัติการขับไล่น้ำเพิ่มขึ้น ส่วนการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่ามีสารปรับปรุง (Modifying agents) ยึดติดบนบริเวณพื้นผิวของเส้นใยไหมและเส้นใยขนสัตว์ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นไปตาม % Weight gain ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการนำไปใช้ประโยชน์ คือนำไปเตรียมเป็นวัสดุสิ่งทอที่มีสมบัติการขับไล่น้ำได้

นอกจากนี้ T. Arai และคณะ [63] ศึกษาการสลายตัวทางชีวภาพของเส้นใยไหมพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) โดยการบ่มเพาะเส้นใยไหมและฟิล์มไหมด้วยเอนไซม์โปรติโอไลติก (Proteolytic) ได้แก่ คอลลาจีเนส (Collagenase type F) แอลฟา-ไคโมทริปซิน (α -Chymotrypsin type I-S) โปรติเอส (Protease type XXI) เป็นระยะเวลา 1-17 วัน น้ำหนักของตัวอย่างและระดับของการพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization) ของเส้นใยไหมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่ความ

แข็งแรงและการดึงยึดลดลงอย่างมาก โดยสัมพันธ์กับเวลาในการย่อยสลาย การบ่มเพาะด้วย เอนไซม์โปรติโอไลติกเหล่านี้ทำให้ฟิล์มโพลีเอทิลีนใหม่มีน้ำหนักและระดับของการพอลิเมอไรเซชันลดลง อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งขึ้นกับชนิดของเอนไซม์ อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อสารที่เอนไซม์ทำปฏิกิริยา และเวลาในการย่อยสลาย จากการวิจัยพบว่าโปรติเอสมีฤทธิ์รุนแรงต่อการย่อยสลายมากกว่าแอลฟา ไคโมทริปซินหรือคอลลิจินเนส นอกจากนี้พบว่าเส้นใยโพลีเอทิลีนใหม่ที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพมีความหยาบ ขรุขระที่พื้นผิวมากขึ้น ขณะที่ฟิล์มโพลีเอทิลีนใหม่มีพื้นผิวที่เป็นร่อง มีรอยแตก และเกิดช่องว่างขึ้น

P. Jiang และคณะ [64] ทดสอบสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยโพลีเอทิลีนใหม่จากรังไหมดิบที่ผ่านการ ลอกกาวโดยใช้สารในการลอกกาวที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ น้ำกลั่น กรดบอริก-โซเดียมบอเรต บัฟเฟอร์ โซเดียมคาร์บอเนต ยูเรีย และกรดซัลฟูริก พบว่าการลอกกาวทำให้มอดูลัสยืดหยุ่นและจุด คราก (Yield point) ลดลงอธิบายได้ว่าการลอกกาวทำให้พันธะไฮโดรเจนและ/หรือแรง วันเดอร์วาลส์อ่อนแอลง และพบว่ามีปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัยที่ร่วมกับการลอกกาวแล้วส่งผลต่อ สมบัติทางแรงดึงของไหม คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล (Microstructure) และอัตราส่วน ในการลอกกาว เมื่อใช้ยูเรียและโซเดียมคาร์บอเนตในการลอกกาวพบว่าความแข็งแรง (Failure strength) ลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากการจัดเรียงตัวโมเลกุลของไหม ปริมาณและความสมบูรณ์ ของผลึกลดลง นอกจากนี้ฐานวิชาของพื้นผิวและรอยแตกหักชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างภายในของ เส้นใยโพลีเอทิลีนใหม่มีความแตกต่างกันเมื่อใช้วิธีการลอกกาวที่ต่างกัน การลอกกาวด้วยบัฟเฟอร์บอเรตดีกว่าวิธี ในการลอกกาวอื่นๆ ในเรื่องของสมบัติเชิงกลของไหมและการเอาไหมออก

P. S. Vankar และคณะ [65] ศึกษาการย่อยสลายไหมและผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมธรรมชาติ ได้แก่ สมอเทศ (*Terminalia arjuna*) ทับทิม (*Punica granatum*) และชุมเห็ดเทศ (*Rheum emodi*) โดยใช้ เอนไซม์สร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดแทนนิกก่อน (Pretreatment) โดยเอนไซม์ที่ใช้ ได้แก่ เอนไซม์โปรตีเอส-อะไมเลส (Protease-amylase) เอนไซม์ไดเอสเทอเรส (Diastase) และ เอนไซม์ไลเปส (Lipase) การ Pretreat ด้วยเอนไซม์เหล่านี้ทำให้จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม ของผ้าไหมและผ้าฝ้ายเป็นไปอย่างรวดเร็วและการดูดซับโดยรวมสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการ pretreat ค่า CIELab แสดงให้เห็นถึงผลที่ดีขึ้นเมื่อปรับปรุงด้วยการ treatment ด้วยเอนไซม์ ดังนั้น การทำปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างกรดแทนนิก เอนไซม์ และสีย้อมเป็นการย้อมอีกทางเลือกหนึ่งที่ไม่ เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

S. Rodrigues และคณะ [66] ศึกษาการสกัดสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ด้วย เทคนิคอัลตราซาวด์ (Ultrasound) จากฝักกะลามะพร้าว (*Cocos nucifera*) โดยให้ความร้อนแก่ฝัก กะลามะพร้าวที่อุณหภูมิแตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ นอกจากนี้ศึกษาถึงผลของเวลา ที่ใช้ในการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในการสกัดด้วย จากการศึกษพบว่าเวลาที่ใช้ในการสกัด ส่งผลอย่างมากต่อปริมาณของฟีนอลิกในสารสกัด ส่วนอุณหภูมิมีผลสำคัญรองลงมาและเวลาใน การให้ความร้อนมีผลน้อยที่สุด สภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้รับปริมาณฟีนอลิกที่สูงในการสกัด คือ

การใช้เวลาในการให้ความร้อนที่ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 100° C และเวลาในการสกัดด้วยเทคนิคอัลตราซาวด์ที่ 60 นาที

การใช้อุณหภูมิที่สูงทำให้ได้ปริมาณของเฟอร์ฟูรัล (Furfural) สูงขึ้น ซึ่งเป็นสารประกอบที่อันตราย (Carcinogenic compound) นอกจากนี้ยังทำให้ต้นทุนสูงอีกด้วย S. Rodrigues และคณะ [67] จึงได้ศึกษาการใช้อุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ต่ำลงและยังมีการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็ง pH และเวลาที่ใช้ในการสกัดด้วย พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สารประกอบฟีนอลิกมากที่สุดโดยเทคนิคอัลตราซาวด์ คือ การใช้อัตราส่วน 50% โดยปริมาตรของเอทานอลต่อน้ำ ความร้อนที่ 30° C อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อของแข็งคือ 50 สกัดที่เวลา 15 นาที ที่ความเข้มข้นของคลื่นอัลตราซาวด์ 4,870 วัตต์ต่อตารางเมตร และที่ pH เท่ากับ 6.5 ทำให้ได้สารประกอบฟีนอลิก 22.44 มิลลิกรัมต่อหนึ่งกรัมของกาบมะพร้าว

A. Kojthung และคณะ [68] ศึกษาการลดระยะเวลาในการเสื่อมสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ของเส้นใยไหมโดยการฉายรังสีแกมมาผ่านไหมที่ได้จากหนอนไหมพันธุ์พื้นเมืองไทย (*Bombyx mori*) โดยทำการฉายรังสีด้วยปริมาณรังสีที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จากนั้นนำไปทดสอบการเสื่อมสลายทางชีวภาพ พบว่าการเสื่อมสลายทางชีวภาพของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของรังสีให้มากขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากความอ่อนแอของพันธะเพปไทด์ในพอลิเพปไทด์ของเส้นใย การลดลงของโครงสร้างเบต้าชีทในเส้นใยไหม ซึ่งถูกเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบสุ่ม (Random coil) การเพิ่มของการกักกร่อนและการแตกเป็นร่องหรือแยกเป็นรอยของเส้นใย นอกจากนี้พบว่ามีการปล่อยโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกมาด้วย

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

1. เส้นใยไหมดิบพันธุ์บอมบิกซ์ โมริ *Bombyx mori* (บริษัท จิมทอมป์สัน ประเทศไทย จำกัด)
2. มอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) (บริษัท Sigma เกรควิเคราะห์)
3. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate, APS, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) (บริษัท Fluka เกรควิเคราะห์)
4. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
6. กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
8. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
9. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
10. สปันู (Span 80) (บริษัท Fluka เกรควิเคราะห์)
11. เกลืออะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟตโดเดคาไฮเดรต (Aluminium potassium sulphate dodecahydrate, $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (บริษัท Fluka เกรควิเคราะห์)
12. อะซีโตน (Acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) (บริษัท Fisher เกรควิเคราะห์)
13. เอทานอล (Ethanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
14. แอล-ฮิสติดีน โมโน-ไฮโดรคลอไรด์ โมโนไฮเดรต (L-histidine mono-hydrochloride mono-hydrate, $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_2\text{N}_3\text{HCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
15. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
16. ผกิกไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium hydrogen orthophosphate dodecahydrate, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (บริษัท Merck เกรควิเคราะห์)
17. น้ำสปันู (1993 AATCC Standard Reference Detergent Without Optial Brightening Agent และโซเดียมเปอร์บอเรต (Sodium perborate)) (บริษัท Sumeth Labtest Co., Ltd.)
18. ก๊าซไนโตรเจนและไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)

19. น้ำกลั่น (Distilled water)

20. สีย้อมแอซิด (Modercron Olive MG Lot No. A6406D01 : C.I. Acid Green 73) (บริษัท

Modern Dyestuffs & Pigments จำกัด)

21. กาบมะพร้าวแห้ง (*Cocos nucifera* Linn.) (C.I. Natural Brown 6)

22. ใบเตย (*Pandanus odoratus* Ridi.) (C.I. Natural Green 3)

23. ใบจี้เหล็ก (*Cassia siamea* Lamk.)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

1. บีกเกอร์

2. ขวดวัดปริมาตร

3. แท่งแก้วคน

4. ซ้อนตักสาร

5. หลอดทดลอง

6. บีเปต

7. หลอดหยด

8. ปากกีสบ

9. กระจกดวง

10. ขวดน้ำกลั่น

11. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

12. เทอร์โมมิเตอร์

13. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

14. ตู้อบแบบสุญญากาศ

15. เครื่องวัด pH

16. โดคูดความชื้น

17. กระจกนาฬิกา

18. เครื่องปั่น

19. เครื่องกรองสุญญากาศ

20. เกรย์สเกล (Gray scale)

21. กระดาษทึบแสง

22. ผ้าฝ้ายและผ้าไหมมาตรฐานสีขาว

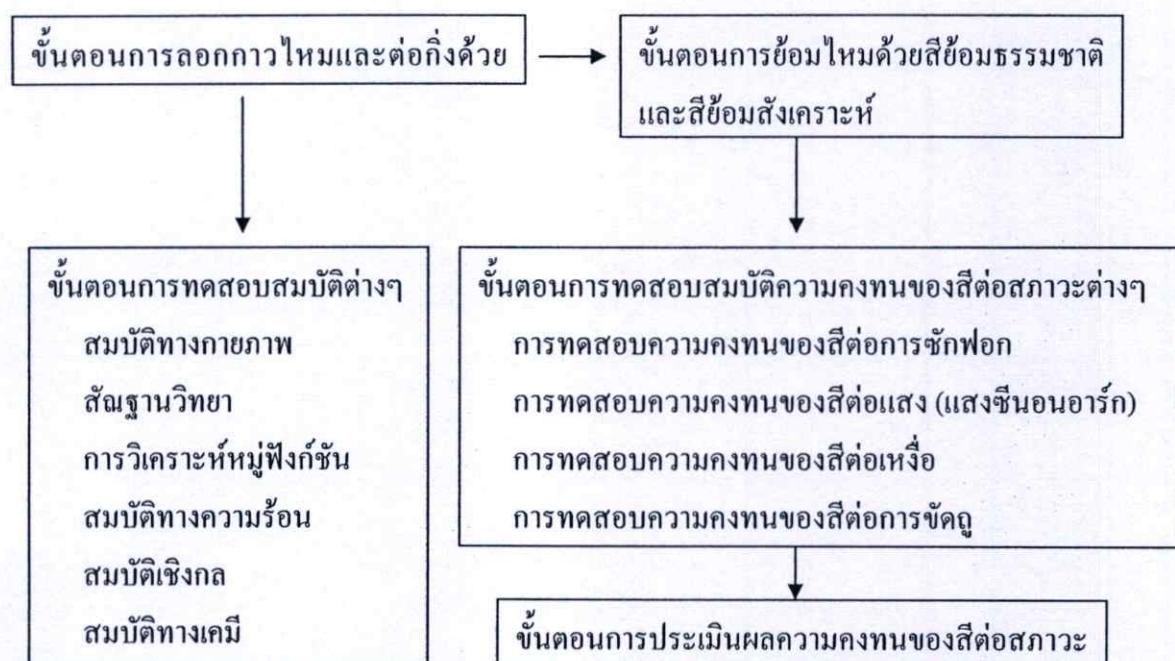
23. ผ้าขนสัตว์มาตรฐานสีน้ำเงิน

24. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : รุ่น LEO 1455 VP (บริษัท LEO Electron Microscopy Ltd. : ประเทศอังกฤษ)
25. เครื่องวิเคราะห์ทางเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) : รุ่น FTIR Spectrum GX (บริษัท PerkinElmer Life and Analytical Sciences, Inc : ประเทศสหรัฐอเมริกา)
26. เครื่องวิเคราะห์ทางเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) : รุ่น TGA Pyris 1 (บริษัท PerkinElmer Life and Analytical Sciences, Inc : ประเทศสหรัฐอเมริกา)
27. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : รุ่น LR 5K (บริษัท Lloyd Instruments Ltd. : ประเทศอังกฤษ)
28. เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer) : รุ่น Se λ ios α (บริษัท Thermo Electron Corporation : ประเทศอังกฤษ)
29. เครื่องวัดสีคัลเลอร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Color Spectrophotometer) : รุ่น MiniScan XE Plus (บริษัท Color Associates Co., Ltd. : ประเทศไทย)
30. เครื่องทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใย (Yarn Friction Tester) : รุ่น No. 527 (บริษัท Asano Machine MFG Co., Ltd. : ประเทศญี่ปุ่น)
31. เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (Launder-o-meter) : รุ่น A11-45791 (บริษัท Atlas Electric Devices Co., Ltd. : ประเทศสหรัฐอเมริกา)
32. เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (Xenon-arc Lamp) : รุ่น Ci3000+ (บริษัท Atlas Electric Devices Co., Ltd. : ประเทศสหรัฐอเมริกา)
33. เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Perspirometer) : รุ่น PR-1 (บริษัท Atlas Electric Devices Co., Ltd. : ประเทศสหรัฐอเมริกา)
34. เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู (Crock Meter) : รุ่น FR-1B (บริษัท Suga Test Instruments Co., Ltd. : ประเทศญี่ปุ่น)
35. เครื่องวัดความหยิกงอของเส้นด้ายหรือเส้นใย (Crimp Tester) : รุ่น P520678 (บริษัท Shirley Developments Ltd. : ประเทศอังกฤษ)

3.3 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย [13, 16]

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนในการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการลอกกาวยไหม ขั้นตอนการต่อกึ่งไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์ ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์และขั้นตอนการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา การ

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อการขัดถูของ เส้นใยและสมบัติความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 3.1 ดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการลอกกาวยไหม [48]

งานวิจัยนี้ลอกกาวยไหมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยไหมดิบต่อสารละลายที่ใช้ในการลอกกาวยเป็น 1:30 (w/v) (Material to liquid ratio 1:30)

1. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการลอกกาวย ซึ่งประกอบด้วย

- สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
- สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
- สบู่ (Span 80) 3 กรัมต่อลิตร (9% o.w.f)

2. ชั่งเส้นใยไหมดิบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก

3. นำเส้นใยไหมดิบที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปแช่ในสารละลายที่ใช้ในการลอกกาวยที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตกับสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นอัตราส่วน 1:1

4. นำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80° C เป็นเวลา 30 นาที

5. นำเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวยแล้วมาล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง ซับให้แห้งและตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศ

6. นำเส้นใยไหมลอกกาวที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาน้ำหนักที่หายไปหลังการลอกกาว (Weight loss) ดังนี้

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

เมื่อ w_1 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังการลอกกาว

w_2 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมดิบเริ่มต้น

3.3.2 ขั้นตอนการต่อกึ่งไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์ [48]

งานวิจัยนี้ทำการต่อกึ่งเส้นใยไหมลอกกาวด้วยไวนิลมอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยไหมต่อสารละลายมอนอเมอร์ต่อสารละลายตัวริเริ่มเป็น 1:20:1 (w/v/v)

1. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการต่อกึ่ง ซึ่งประกอบด้วย

- สารละลายมอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) 0.05 โมลต่อลิตร
- สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลต่อลิตร

2. นำสารละลายของ HEMA ในแต่ละความเข้มข้น (0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร) ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา 1 มิลลิลิตร

3. ปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 3 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลต่อลิตร ซึ่งถ้าใช้มอนอเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ใช้สารละลายกรด 9 หยด และในกรณีที่ใช้มอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ใช้สารละลายกรด 2 หยด ทำให้ได้สารละลายที่ใช้ในการต่อกึ่งเส้นใยไหมซึ่งมี pH ตามต้องการ

4. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของเส้นใยไหมลอกกาวด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก

5. นำเส้นใยไหมลอกกาวที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาแช่ในสารละลายที่ใช้ในการต่อกึ่ง

6. นำไปผ่านก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 วินาที แล้วปิดบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟอยล์ให้สนิทเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการต่อกึ่ง

7. นำของผสมที่ได้ไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80° C ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที

8. นำเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งไปล้างด้วยอะซิโตน 2-3 ครั้งและล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้งเพื่อกำจัดไวนิลมอนอเมอร์ที่เหลือจากการพอลิเมอไรซ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

9. นำเส้นใยไหมไปอบในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศ

10. นำเส้นใยไหมที่ได้หลังจากการต่อกิ่งไปชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้น (% Weight gain) ดังนี้

$$\% \text{ Weight gain} = [(w_2 - w_1) / w_1] \times 100$$

เมื่อ w_1 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมที่ลอกกาแล้ว

w_2 คือ น้ำหนักของเส้นใยไหมหลังผ่านกระบวนการต่อกิ่ง

3.3.3 ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติ [30, 45, 47]

สีย้อมธรรมชาติที่ใช้ในการย้อมเส้นใยไหม คือ สีย้อมที่ได้จากกาบมะพร้าวแห้ง ใบเตยและใบขี้เหล็ก โดยนำเส้นใยไหมหลังการลอกกาและเส้นใยไหมหลังการต่อกิ่งที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกันมาทำการย้อมสี โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยไหมต่อสารละลายสีย้อมเป็น 1:30 (w/v) และอัตราส่วนระหว่างวัสดุธรรมชาติต่อสารละลายที่ใช้ในการสกัด (Material to liquid ratio) ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแห้งต่อน้ำกลั่นเป็น 1:30 (w/v) [45]

- เลือกใช้อัตราส่วนระหว่างใบเตยต่อสารละลายผสมระหว่างน้ำกับเอทานอล (อัตราส่วน 25:75) เป็น 1:10 (w/v) เนื่องจากคลอโรฟิลล์ในใบเตยสามารถละลายในเอทานอลได้ [36]

- อัตราส่วนระหว่างใบขี้เหล็กต่อน้ำกลั่นเป็น 1:10 (w/v) [47]

ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีย้อมจากวัสดุธรรมชาติ

1. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการย้อมเส้นใยไหม

- นำวัสดุธรรมชาติมาทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ พร้อมสารละลายที่ใช้ในการสกัดตามอัตราส่วนข้างต้นมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75-80° C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่สำหรับใบเตยให้นำใบเตยสดที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆพร้อมสารละลายที่ใช้ในการสกัดตามอัตราส่วนข้างต้นมาทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นและแช่ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีโดยไม่ต้องให้ความร้อน

- นำมากรองเอากากออกโดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ จะได้สารละลายที่ใช้ในการย้อมเส้นใยไหม

2. เตรียมสารละลายมอร์แดนท์ (มอร์แดนท์อะลูมิเนียม)

- ตวงน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40-50° C เติมสารส้มลงไปโดยใช้ปริมาณของสารส้มเป็น 15% ของน้ำหนักเส้นใยไหมที่จะย้อม ให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที

3. เตรียมเส้นใยไหมที่จะนำมาย้อม

- นำเส้นใยไหมที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60-65° C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการซักให้แห้ง

4. นำเส้นใยไหมที่เตรียมได้ในข้อที่ 3 มาทำการย้อมด้วยสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้ในข้อ 1 โดยใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ทำการย้อม และใช้อุณหภูมิในการย้อมคือ 70-80° C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่

สำหรับการย้อมด้วยสีย้อมจากไบโเคยใช้อุณหภูมิที่ 55-65° C เป็นเวลา 30 นาที ในขณะที่ย้อมต้องทำการพลิกเส้นใยใหม่บ่อยๆ เพื่อให้ติดสีย้อมอย่างสม่ำเสมอ หลังจากการย้อมทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำเส้นใยใหม่ที่ได้ออกไปล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

5. นำสารละลายที่ใช้ในการย้อมเส้นใยใหม่ทั้งก่อนและหลังการย้อมเส้นใยใหม่มาวิเคราะห์ด้วย UV-Vis Spectrophotometer เพื่อหาความสามารถในการดูดซับสีซึ่งคำนวณได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น (λ_{max}) ที่ 289 330 และ 400 นาโนเมตร สำหรับสีย้อมกามมะพร้าวแห้ง สีย้อมไบโเคยและสีย้อมไบชีเหล็ก ตามลำดับ ดังนี้

$$\text{Dye uptake (\%)} = (A_0 - A_t) / A_0 \times 100$$

เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการย้อม

A_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านการย้อม

3.3.4 ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีย้อมสังเคราะห์ [72]

นอกจากการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติ งานวิจัยนี้ยังได้มีการนำเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกันมาย้อมด้วยสีย้อมสังเคราะห์ โดยงานวิจัยนี้ใช้สีย้อมแอซิด (C.I. Acid Green 73) ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยไหมต่อสารละลายสีย้อมเป็น 1:20 (w/v) และใช้ปริมาณของสีย้อมเป็น 2 % o.w.f

ขั้นตอนการย้อมไหมด้วยสีย้อมแอซิด

1. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการย้อมเส้นใยไหม โดยชั่งน้ำหนักผงสีย้อมแอซิดปริมาณ 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสต็อกของสีย้อมซึ่งมีความเข้มข้น 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
2. ปรับ pH ของสารละลายสีย้อมด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 10 % โดยปริมาตร ให้มี pH อยู่ในช่วง 5-6
3. นำเส้นใยไหมที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60-65° C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการซักให้แห้ง
4. ทำการย้อมเส้นใยไหมที่อุณหภูมิ 98-100° C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสีแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องและล้างจนน้ำไม่เกิดการเปลี่ยนสี
5. นำเส้นใยไหมไปล้างสีที่ไม่ยึดติดบนเส้นใยในน้ำสบู่ความเข้มข้น 1-2 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40° C

6. ทำการแช่เส้นใยไหมด้วยสารละลายกรดอะซีติกที่มีความเข้มข้น 5-6 % โดยปริมาตร เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 70° C จากนั้นล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งและทำการซับให้แห้ง
7. นำสารละลายที่ใช้ในการย้อมเส้นใยไหมทั้งก่อนและหลังการย้อมเส้นใยไหมมาวิเคราะห์ด้วย UV-Vis Spectrophotometer เพื่อหาความสามารถในการดูดซับสีซึ่งคำนวณได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น (λ_{max}) ที่ 286 นาโนเมตร ดังนี้

$$\text{Dye uptake (\%)} = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100$$

เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการย้อม

A_1 คือ ค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านการย้อม

3.3.5 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.5.1 ลักษณะวิทยาของเส้นใยไหม

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมลอกทาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกัน โดยใช้ SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า (Magnification = 500 x) และ 1500 เท่า (Magnification = 1.5 K x) โดยก่อนนำเส้นใยไหมไปทำการวิเคราะห์จะต้องนำไปเคลือบด้วยทองเพื่อป้องกันการเกิดประจุสะสมบนบริเวณพื้นผิวของเส้นใย

3.3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยไหมที่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันในระดับโมเลกุลของเส้นใยไหมลอกทาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกันด้วยเทคนิค FTIR โดยการเตรียมตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นให้ตัดเส้นใยออกเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide, KBr) จากนั้นทำให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัด หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมดในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} โดยทำการสแกนทั้งหมด 4 รอบต่อ 1 ตัวอย่าง

3.3.5.3 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกทาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค TGA ที่อัตราการให้ความร้อน 10° C/นาที ในช่วงอุณหภูมิ 50–800° C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

3.3.5.4 การทดสอบความคงทนต่อกรดและด่าง [18]

1. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร (pH เท่ากับ 0.0) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (pH เท่ากับ 13.0)

2. นำตัวอย่างเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งที่แตกต่างกันมาอบให้แห้งด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
3. เทสารละลายกรดและด่างลงในหลอดทดลองโดยใช้ปริมาณสารละลายหลอดละ 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิจนสารละลายมีอุณหภูมิ 65° C
4. นำเส้นใยไหมแต่ละชนิดที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาใส่ในหลอดทดลองที่เตรียมไว้ในข้อ 3 จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง ซับให้แห้งพอหมาดๆ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียไปในหน่วยเปอร์เซ็นต์

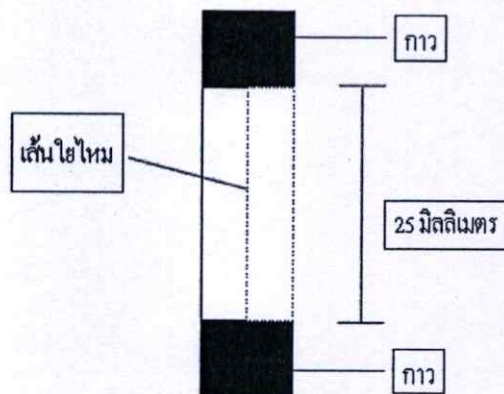
$$\% \text{ weight loss} = [(w_1 - w_2) / w_1] \times 100$$

เมื่อ w_1 คือ น้ำหนักของไหมเริ่มต้น

w_2 คือ น้ำหนักของไหมหลังการทดสอบ

3.3.5.5 สมบัติเชิงกลของเส้นใย [52, 69-70]

ศึกษาหาค่าแรงที่ใช้ในการดึง เทนาซิตี เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ Load cell ขนาด 100 นิวตัน และใช้ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตร/นาที ระยะในการจับชิ้นงาน 25 มิลลิเมตร โดยเตรียมตัวอย่างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะในการเตรียมตัวอย่างเส้นใยไหมเพื่อทดสอบสมบัติทางแรงดึง [70]

3.3.5.6 ความคงทนต่อการขัดถู (Wear strength) (JIS L 1095 : 1990 METHOD B)

นำตัวอย่างเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกันตัวอย่างละ 20 เส้น มาเรียงใส่ในเครื่องทดสอบ Asano Yarn Friction Tester No. 527 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักในการถ่วงเส้นใยที่ปลายทั้งสองด้าน ซึ่งมีน้ำหนักแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นใย (Tex) ที่ต้องการทดสอบ สภาวะที่ใช้ทดสอบมีดังต่อไปนี้

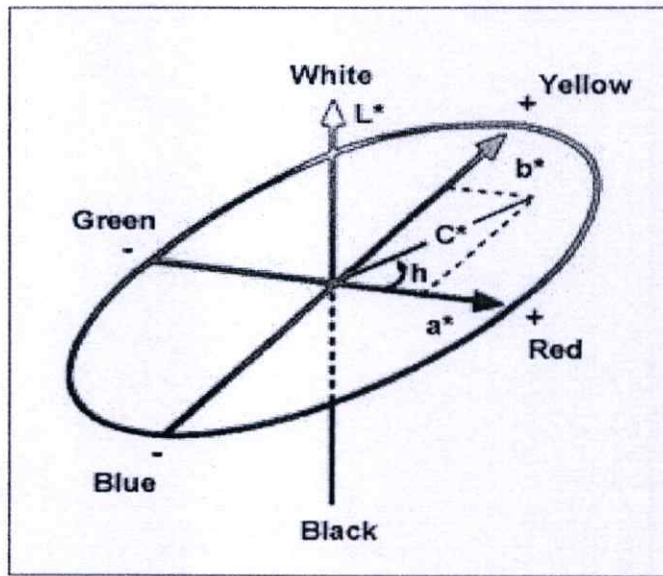
-Friction speed	120	ครั้ง/นาที
-Friction angle	110°	
-Reciprocating distance	2.5	เซนติเมตร
-Test length	20	เซนติเมตร
-Friction device	Hard steel	

รายงานผลโดยวัดจำนวนครั้งของการขัดถูที่ทำให้เส้นใยเส้นที่สองขาด ทำซ้ำ 10 ครั้ง และรายงานเป็นค่าเฉลี่ย

3.3.5.7 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี [73]

ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA เมื่อย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น MiniScan XE Plus โดยใช้ระบบของ CIE L* a* b* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65/10° เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน โดย

L*	:	ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness) L = 0 = perfect black sample L = 100 = perfect white sample
a*	:	ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (red-green) a เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีแดง a เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว
b*	:	ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (yellow-blue) b เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง b เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน
C* (Chroma)	:	ความสดใสของสี จากสูตร $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$
h° (Hue angle)	:	เป็นตัวเลขที่ระบุว่าสีนั้นมีตำแหน่งอยู่ที่ใด (องศา) จากสูตร $h^\circ = \tan^{-1} [b^* / a^*]$



รูปที่ 3.3 โคออดิเนตของ CIE L*a*b* Color Space [74]

3.3.5.8 การทดสอบความคงทนของสีย้อมต่อสภาวะต่างๆ

ขั้นตอนนี้ นำตัวอย่างเส้นใยไหมลอกขาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งที่แตกต่างกันที่ผ่านการย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติ และสีย้อมสังเคราะห์มาศึกษาความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ได้แก่ ความคงทนของสีต่อการซักฟอก ความคงทนของสีต่อแสง ความคงทนของสีต่อเหงื่อ ความคงทนของสีต่อการขัดถู ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักฟอก (ISO 105-C06 : 1994 (E) METHOD A2S)

1. เตรียมผ้ามาตรฐานสีขาวสำหรับทดสอบซึ่งเป็นผ้าฝ้าย 1 ชั้นและผ้าไหม 1 ชั้น ขนาด 4 x 10 เซนติเมตรต่อ 1 ตัวอย่าง
2. ชั่งน้ำหนักของผ้าทั้งสองชิ้นรวมกันและชั่งน้ำหนักเส้นใยไหมที่ต้องการทดสอบให้ได้ครึ่งหนึ่งของน้ำหนักผ้ามาตรฐานที่ชั่งได้
3. จัดวางเส้นใยให้ขนานตามความยาวของผ้ามาตรฐาน หลังจากนั้นนำผ้าไหมและผ้าฝ้ายมาตรฐานที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มาประกบและขริบเส้นใยที่มีความยาวเกินกว่าผ้ามาตรฐาน แล้วเย็บริมขอบทั้งสี่ด้าน
4. เตรียมน้ำสบู่ 150 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมได้จาก 1993 AATCC Standard Reference Detergent Without Optical Brightening Agent ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร และ โซเดียมเปอร์บอเรต (Sodium perborate) ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร
5. นำชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบใส่ในกระบอกซัก หลังจากนั้นเติมสารละลายน้ำสบู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 4 โดยให้มีอัตราส่วนน้ำหนักระหว่างวัสดุต่อของเหลวเป็น 1:50

6. นำเข้าเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซักที่อุณหภูมิ 40° C เป็นเวลา 30 นาที
7. เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องซักแล้วทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้งและนำไปผ่านน้ำซึ่งไหลตลอดเวลา 10 นาที
8. บีบน้ำออกจากชิ้นงานทดสอบและเกาะด้ายที่เย็บออก 3 ด้านโดยเว้นด้านกว้างไว้ด้านหนึ่ง
9. ตากชิ้นงานทดสอบให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60° C โดยกางผ้าสามชิ้นออกจากกัน
10. รายงานค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบและค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐานโดยการเปรียบเทียบกับเกรย์สเกล

2. การทดสอบความคงทนของสีต่อแสง (แสงซินอนอาร์ก) (ISO 105-B02 : 1994 (E))

1. เตรียมผ้าสีมาตรฐานซึ่งเป็นผ้าขนสัตว์สีน้ำเงินที่ย้อมด้วยสีดังตารางที่ 3.1 โดยมีค่าความคงทนของสีต่อแสงจากระดับต่ำสุดคือ 1 และสูงสุดคือ 8 โดยแต่ละระดับมีค่าความคงทนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
2. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างแต่ละชิ้นให้มีขนาด 20 มิลลิเมตร x 55 มิลลิเมตร โดยพันรอบกระดาษแข็ง
3. วางเรียงชิ้นงานทดสอบและผ้าสีมาตรฐานตามลำดับดังตารางที่ 3.1 จากนั้นปิดกระดาษที่บดแสงบนชิ้นงานทดสอบและผ้ามาตรฐาน
4. นำไปเข้าเครื่องฉายแสงโดยใช้แสงซินอนอาร์กที่มีความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร เป็นเวลา 40 ชั่วโมง หลังจากนั้นประเมินค่าความคงทนของสีต่อแสงของชิ้นงานทดสอบโดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบกับผ้าสีมาตรฐานสีน้ำเงิน

ตารางที่ 3.1 สีที่ใช้ย้อมผ้าสีมาตรฐาน

อัตราความคงทนต่อแสง	สีที่ใช้ย้อม*
1	C.I. Acid Blue 104
2	C.I. Acid Blue 109
3	C.I. Acid Blue 83
4	C.I. Acid Blue 121
5	C.I. Acid Blue 47
6	C.I. Acid Blue 23
7	C.I. Solubilized Vat Blue 5
8	C.I. Solubilized Vat Blue 8

*จากหนังสือ Colour Index, second edition, volume 1. The Society of Dyers and Colourists, Bradford, Yorkshire, 1956.

3. การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (ISO 105-E04 : 1994 (E))

ในการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ความคงทนของสีต่อเหงื่อที่มีฤทธิ์เป็นกรดและความคงทนของสีต่อเหงื่อที่มีฤทธิ์เป็นด่าง โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

การเตรียมสารละลายเหงื่อเทียมที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) สารละลายเหงื่อเทียมที่มีฤทธิ์เป็นกรด

เตรียมสารละลายแอล-ฮิสติดีน โมโน-ไฮโดรคลอไรด์ โมโน-ไฮเดรต 0.5 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมและผลึกโซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต 2.2 กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตรแล้วใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับสถานะของสารละลายให้มีค่า pH เท่ากับ 5.5

(ข) สารละลายเหงื่อเทียมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง

เตรียมสารละลายแอล-ฮิสติดีน โมโน-ไฮโดรคลอไรด์ โมโนไฮเดรต 0.5 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมและผลึกโซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต 5 กรัมในน้ำกลั่น 1 ลิตร จากนั้นใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับสถานะของสารละลายให้มีค่า pH เท่ากับ 8.0

การทดสอบ

1. เตรียมผ้ามาตรฐานสีขาวสำหรับทดสอบซึ่งเป็นผ้าฝ้าย 1 ชิ้นและผ้าไหม 1 ชิ้น ขนาด 4 x 10 เซนติเมตรต่อ 1 ตัวอย่าง
2. ชั่งน้ำหนักของผ้าทั้งสองชิ้นรวมกัน
3. ชั่งน้ำหนักของเส้นใยไหมที่ต้องการทดสอบให้ได้ครึ่งหนึ่งของน้ำหนักผ้ามาตรฐานที่ชั่ง
4. จัดวางเส้นใยให้ขนานกันตามความยาวของผ้ามาตรฐาน หลังจากนั้นนำผ้าสีขาวมาตรฐานที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มาประกบแล้วเย็บริมด้านกว้างด้านใดด้านหนึ่ง
6. แห่ชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบแต่ละชิ้นในสารละลายเหงื่อแต่ละชนิดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที โดยให้มีอัตราส่วนน้ำหนักระหว่างวัสดุต่อของเหลวเป็น 1 : 50
7. แกว่งและบีบชิ้นงานทดสอบเป็นครั้งคราวเพื่อให้เปียกทั่วกัน
8. เทสารละลายออกแล้วใช้แท่งแก้วคนสองอันบีบสารละลายที่มากเกินไปออก
9. วางชิ้นงานทดสอบระหว่างแผ่นอะคริลิกขนาด 60 มิลลิเมตร x 115 มิลลิเมตร
10. นำไปใส่ในเครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Perspirometer) โดยปรับเครื่องให้แรงกดบนชิ้นทดสอบมีค่าเป็น 44 นิวตัน
11. นำเครื่องการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ $37 \pm 2^{\circ} \text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
12. นำชิ้นงานทดสอบออกจากตู้อบและผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C หลังจากนั้นกางผ้าทั้งสามส่วนออกจากกัน

13. รายงานค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบและค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐาน โดยเปรียบเทียบด้วยเกรย์สเกล

4. การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู (ISO 105-X12 : 2002)

การทดสอบแบ่งเป็นสองส่วน คือ การขัดถูในสภาวะแห้งและการขัดถูในสภาวะเปียก จากนั้นประเมินค่าการเปื้อนสีหรือสีตกคิบนผ้าฝ้ายขาวมาตรฐานกับเกรย์สเกล

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

พื้นเส้นใยใหม่ที่ต้องการทดสอบให้ขนาดกันตามความยาวของกระดาษแข็งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีขนาดไม่เล็กกว่า 140 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร และเตรียมผ้าฝ้ายสีขาวที่ใช้ในการขัดถู (Cotton rubbing cloth) ที่ผ่านการลอกแป้ง (Desize) และฟอกขาว (Bleach) แต่ปราศจากการตกแต่งสำเร็จ โดยตัด Rubbing cloth ให้มีขนาด 50 ตารางมิลลิเมตร (± 2 มิลลิเมตร) ก่อนทำการทดสอบนำชิ้นงานทดสอบและ Rubbing cloth มาควบคุมที่อุณหภูมิ $20 \pm 2^{\circ} \text{C}$ อย่างน้อยเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้มีความชื้นในบรรยากาศเท่ากับ $65 \pm 2\%$ โดยการวางแต่ละชิ้นงานทดสอบและแต่ละชิ้นของ Rubbing cloth แยกจากกันบนตะแกรงหรือบนชั้นที่มีรู

วิธีทดสอบ

1. การขัดถูในสภาวะแห้ง

ใช้หัวขัดของเครื่องครอกมิเตอร์ (Crockmeter) ที่มี Rubbing cloth ขัดถูบนชิ้นงานทดสอบแห้ง ไปมาตามแนวยาวเป็นระยะ 104 ± 3 มิลลิเมตร จำนวน 10 ครั้ง ภายใน 10 วินาที โดยใช้แรงกดที่มีค่า 9 ± 2 นิวตัน

2. การขัดถูในสภาวะเปียก

ให้ใช้ชิ้นงานทดสอบใหม่ที่แห้งเข้าเครื่องครอกมิเตอร์เพื่อขัดถูกับ Rubbing cloth ที่เปียกโดยการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนของ Rubbing cloth ในสภาวะมาตรฐาน หลังจากนั้นทำให้เปียกด้วยน้ำกลั่น และชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ทำให้ได้ % Take up ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 95-100% (ถ้าระดับของการเปียกของ Rubbing cloth ส่งผลต่อการประเมินมากเกินไป อาจใช้ % Take up ที่ $65 \pm 5\%$ ของน้ำหนักของ Rubbing cloth) แล้วทดสอบวิธีเดียวกับการขัดถูในสภาวะแห้ง จากนั้นผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. ประเมินค่าการเปื้อนสีบน Rubbing cloth โดยเปรียบเทียบกับเกรย์สเกลและรายงานค่าการเปื้อนสีบน Rubbing cloth ของทั้งสองสภาวะ

5. การประเมินผลความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบและค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐานของการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ความคงทนของสีต่อเหงื่อและความคงทนของสีต่อการขัดถู สามารถประเมินค่าได้โดยการเปรียบเทียบกับเกรย์สเกล (Gray scale) ดังนี้

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบ (Gray scale for assessing change in colour) (ISO 105-A02)

ระดับ	5	หมายถึง	ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี
ระดับ	4	หมายถึง	สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
ระดับ	3	หมายถึง	สีเปลี่ยนแปลงพอสังเกตได้
ระดับ	2	หมายถึง	สีเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก
ระดับ	1	หมายถึง	สีเปลี่ยนแปลงมาก

ค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐาน (Gray scale for assessing staining) (ISO 105-A03)

ระดับ	5	หมายถึง	ไม่มีการตกติดของสี
ระดับ	4	หมายถึง	สีตกติดเล็กน้อย
ระดับ	3	หมายถึง	สีตกติดพอสังเกตได้
ระดับ	2	หมายถึง	สีตกติดค่อนข้างมาก
ระดับ	1	หมายถึง	สีตกติดมาก

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมลอกกาวพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) ที่ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-Hydroxyethyl methacrylate, HEMA) ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งแตกต่างกันซึ่งสมบัติต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็นสมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมีและความคงทนต่อการขจัดของเส้นใย หลังจากนั้นศึกษาความสามารถในการข้อมดิสีและความคงทนของสีต่อการซัก แสง เหงื่อและการขจัด โดยใช้สีข้อมธรรมชาติและสีข้อมสังเคราะห์ต่างๆ กัน เพื่อศึกษาถึงผลของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์บนเส้นใยที่มีต่อการขิดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ นอกจากนี้ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยขิดสีที่มีต่อความสามารถในการข้อมดิสีข้อมใบไม้เหล็กและความคงทนของสีข้อมใบไม้เหล็กต่อสภาวะต่างๆ ดังนี้

4.1 กระบวนการต่อกิ่งเส้นใยไหมด้วยไวนิลมอนอเมอร์

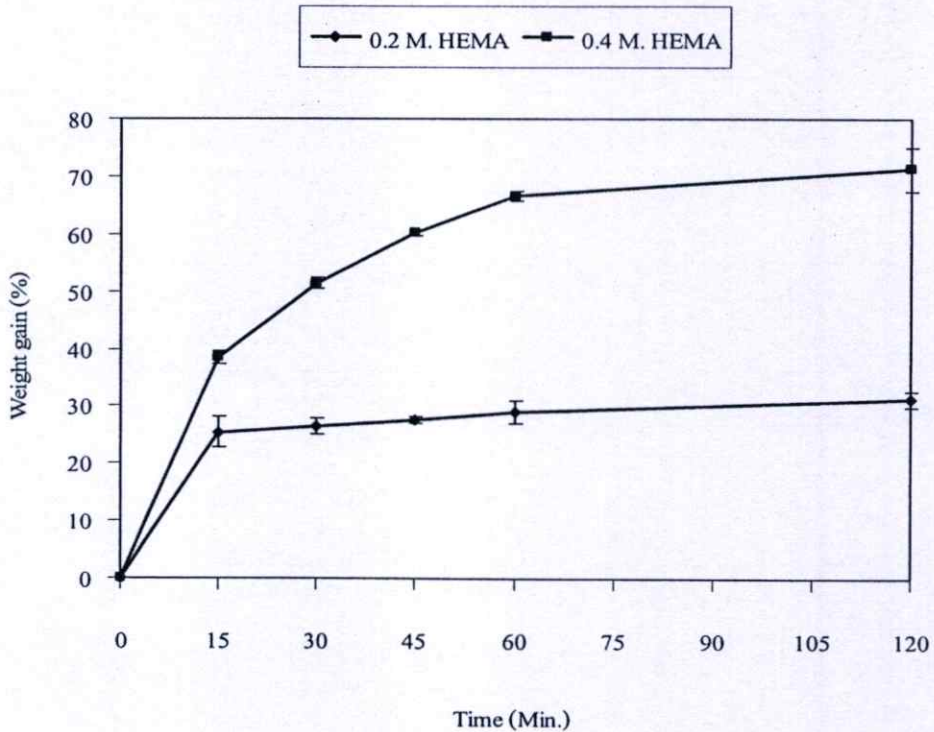
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมลอกกาวโดยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุต่อของเหลวเป็น 1:20 และได้พิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์บนเส้นใยที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

4.1.1 ความสามารถในการต่อกิ่ง

ความสามารถในการต่อกิ่งของ HEMA บนเส้นใยไหม สามารถพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง (% weight gain) และจากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมโดยวิธีการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ พบว่าเส้นใยไหมมีความสามารถในการต่อกิ่งดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 และมีลักษณะหลังการต่อกิ่งที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงด้วย HEMA ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร ที่เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที

HEMA	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลง (% weight gain)				
	เวลา (นาที)				
ความเข้มข้น	15	30	45	60	120
0.2 โมลต่อลิตร	25.4 ± 2.6	26.5 ± 1.4	27.5 ± 0.6	29.0 ± 1.9	31.3 ± 1.5
0.4 โมลต่อลิตร	38.5 ± 1.2	51.4 ± 0.9	60.2 ± 0.5	66.6 ± 0.8	71.3 ± 3.8



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงด้วย HEMA (% Weight gain) ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.4 โมลต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการตอกลง

ตารางที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของเส้นใยไหมหลังการตอ่กึ่งด้วย HEMA เปรียบเทียบกับเส้นใยไหม
ลอกกาว

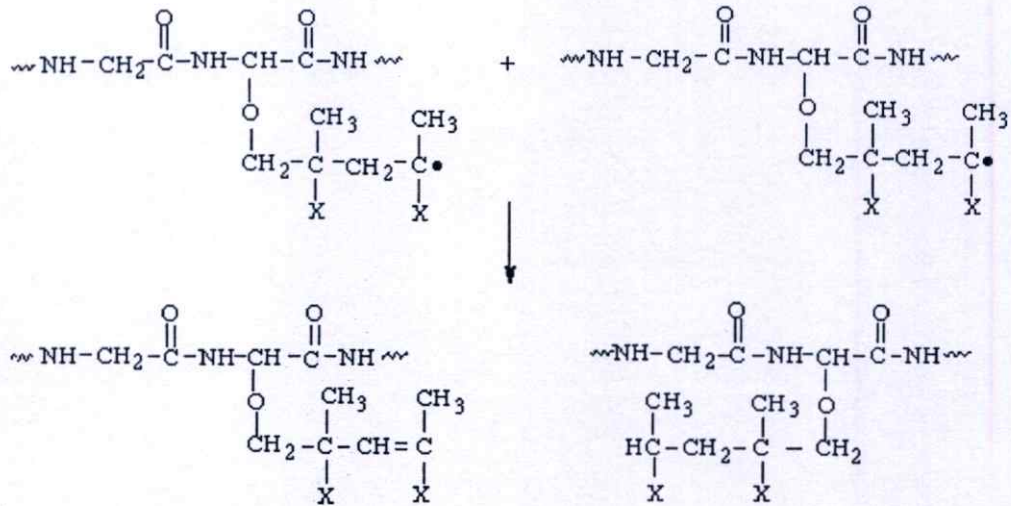
เวลา (นาทึ) ความ เข้มข้น	ลักษณะของเส้นใย ที่ทำการตอ่กึ่งด้วยเวลาที่ต่าง ๆ กัน (นาทึ)				
	15	30	45	60	120
0.2 โมลต่อลิตร	สีขาว ม่นเงา ลดลง มีความ นุ่มใกล้เคียง กับเส้นใยไหม ลอกกาว	สีขาว ม่นเงา ลดลง แข็งกระด้าง มากขึ้น	สีขาว ม่นเงา ลดลง แข็งกระด้าง มากกว่าที่ 30 นาทึ	สีขาว ม่นเงา ลดลง แข็งกระด้าง มากกว่าที่ 45 นาทึ	สีขาว ม่นเงา ลดลง แข็งกระด้าง มากที่สุด
0.4 โมลต่อลิตร	สีขาว ม่นเงา น้อยลง แข็งกระด้าง มากกว่า 0.2 โมลต่อลิตร	สีขาว ม่นเงา น้อยลง แข็งกระด้าง	สีขาว ม่นเงา น้อยลง แข็งกระด้าง	สีขาว ม่นเงา น้อยลง แข็งกระด้าง	สีขาว ม่นเงา น้อยลง แข็งกระด้าง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ HEMA และเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งมากขึ้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการที่ HEMA มีความเข้มข้นมากขึ้นนั้นหมายถึงมีมอนอเมอร์ที่สามารถไปเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งตรงตำแหน่งที่ว่องไวของโครงสร้างโปรตีนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยไหมมากขึ้น จึงเกิดพอลิเมอร์ร่วมมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งมากขึ้นและเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการตอ่กึ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA พบว่าเมื่อใช้เวลาในการตอ่กึ่งมากขึ้นมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเส้นใยหลังการตอ่กึ่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเวลาให้มอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น จึงเกิดพอลิเมอร์ร่วมมากขึ้น

4.1.2 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่ง

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งระหว่าง HEMA กับโปรตีนที่มีหน่วยของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ไกลซีน อะลานีน เซรีนและไทโรซีน ซึ่งมีสายโซ่ข้างเคียงเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งและมีอยู่จำนวนมากในเส้นใยไหมถึงประมาณ 83% [11] ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ HEMA สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 [49]

- แบบดิสพรอพอชันเนชัน (Disproportionation)

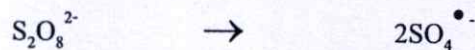


โดย $X = \text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$

รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งระหว่าง HEMA กับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นหมู่ข้างเคียงของกรดอะมิโนของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยไหม [49]

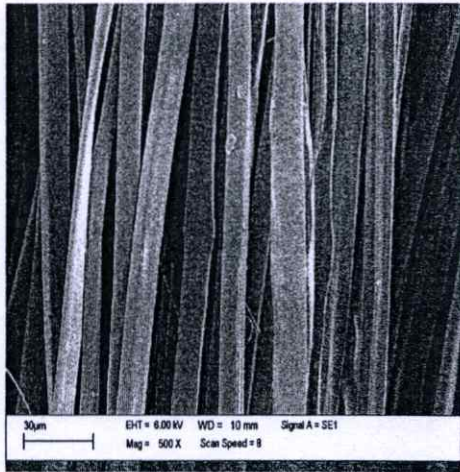
นอกจากนี้ HEMA ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งที่ตำแหน่งที่ว่องไวอื่นๆ ได้ อีก เช่น การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ่กึ่งของ HEMA ที่หมู่เอไมด์ที่อยู่ในโครงสร้างหลักของเส้นใยโปรตีน โดยเริ่มจากแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นตัวริเริ่มแตกตัวให้ออนุมูลอิสระ (Free radical, $\text{SO}_4^{\bullet-}$) ซึ่งไม่เสถียร ดังนั้นอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มจึงเข้าทำปฏิกิริยาที่หมู่เอไมด์ (ในตำแหน่ง N-H) ทำให้ไฮโดรเจนอะตอมหลุดออกมาเกิดเป็น HSO_4^- และเกิดอนุมูลอิสระที่ว่องไวขึ้นที่สายโซ่ของโปรตีนแทน หลังจากนั้นเกิดการขยายสายโซ่โดย HEMA และเกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยาโดยเกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA ดังรูปที่ 4.3

ขั้นริเริ่มปฏิกิริยาและขั้นขยายสายโซ่ (Chain-initiation และ Chain-propagation)

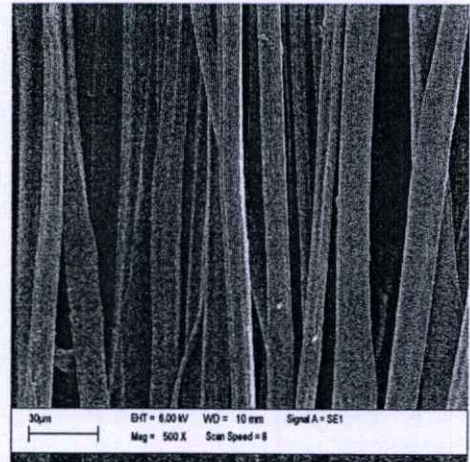


เมื่อ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ คือ ตัวริเริ่มคั้นและ $\text{SO}_4^{\bullet-}$ คือ อนุมูลอิสระ

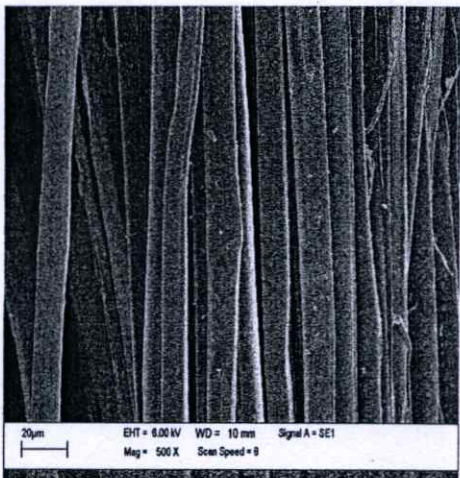
4.2.1 สัณฐานวิทยาของไหมลอกขาวและไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่กำลังขยาย 500 เท่า



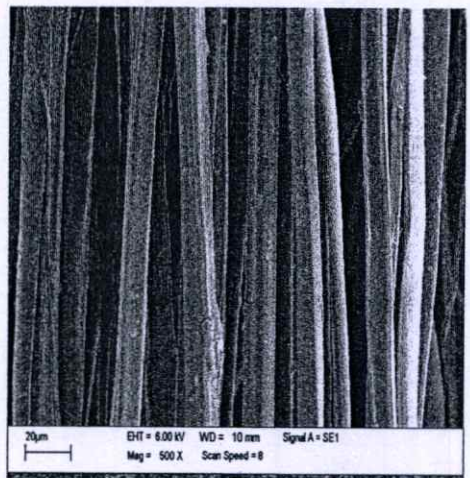
(ก)



(ข)



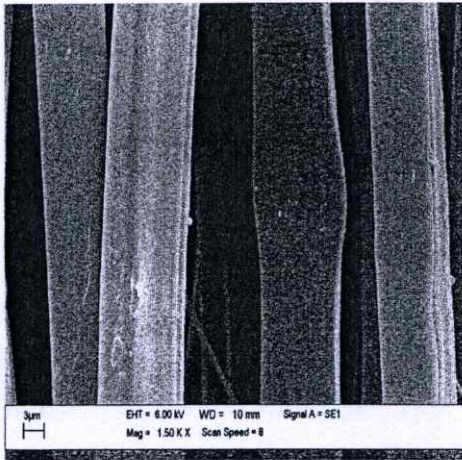
(ค)



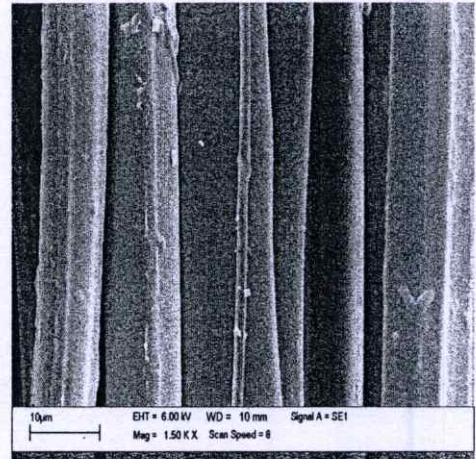
(ง)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ (ก) ไหมลอกขาวและ (ข)-(ง) ไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับ

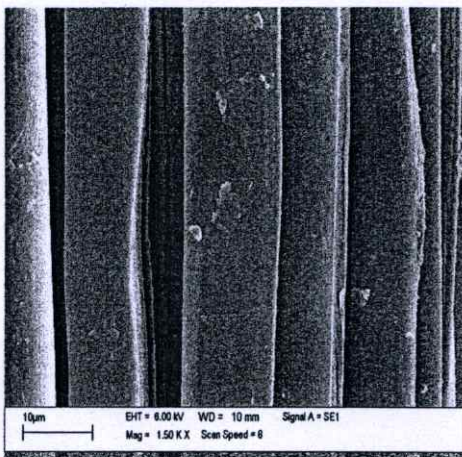
4.2.2 ลักษณะวิทยาของไหมลอกขาวและไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



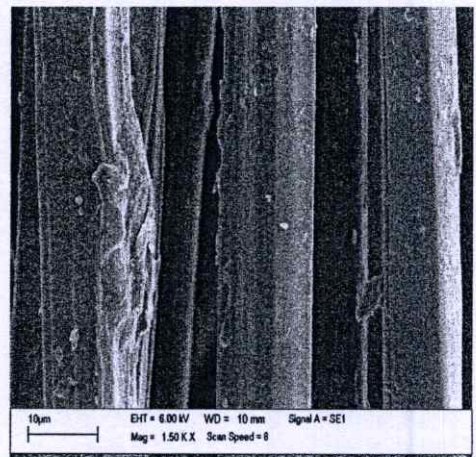
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.5 ลักษณะวิทยาของ (ก) ไหมลอกขาวและ (ข)-(ง) ไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับ

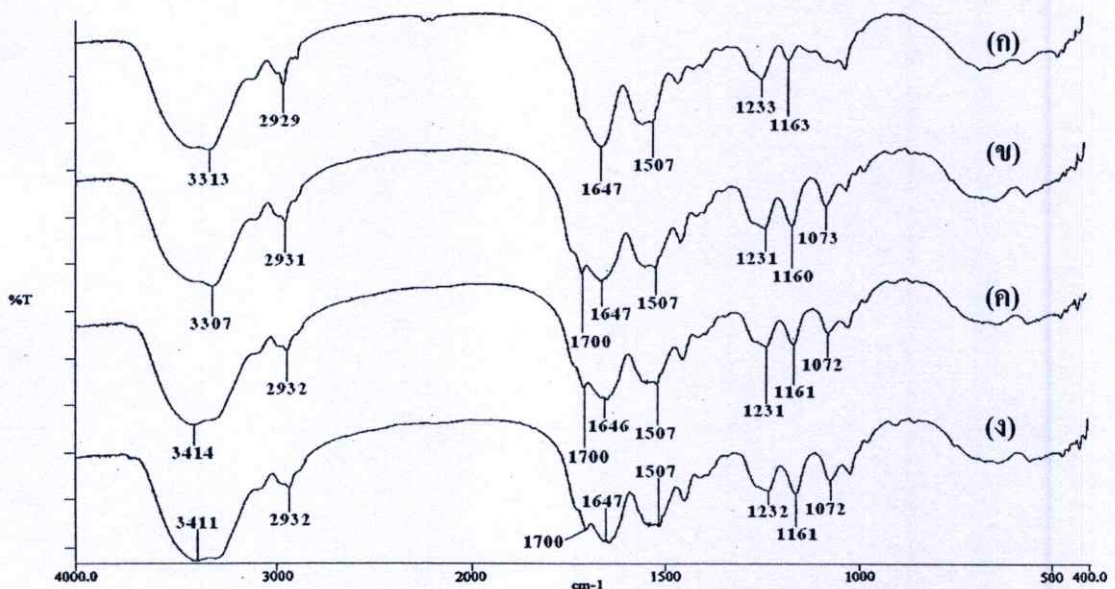
จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไหมลอกขาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA พบว่าลักษณะวิทยาของเส้นใยไหมลอกขาวมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบและสม่ำเสมอกว่าเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่ง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักระหว่างเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งต่างๆ กัน พบว่าเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักระหว่างเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง 31.3% มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากกว่าเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักระหว่างเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง 25.4% และเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักระหว่างเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง 51.4% มีพื้นผิวที่ขรุขระมากที่สุด สามารถอธิบายได้ว่า การที่โครงสร้างโปรตีนของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งกับ HEMA ทำให้เกิดแผ่นพอลิเมอร์ของ

HEMA เกาะอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใย ดังนั้นเมื่อนำมาสังเกตดูบริเวณพื้นผิวของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงเห็นความขรุขระและด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้ส่งผลให้เส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน

งานวิจัยในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาลักษณะหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยไหมลอกกาวและศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นใยไหมหลังจากการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transforms infrared spectroscopy, FTIR) ดังนี้

4.3.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่ง



รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) ไหมลอกกาวและ (ข)-(ง) ไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยเพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมระหว่างเส้นใยไหมลอกกาว (รูปที่ 4.6 (ก)) และเส้นใยไหมต่อกิ่ง (รูปที่ 4.6 (ข)-(ง)) พบว่ามีแถบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันโดยตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สำคัญของโครงสร้างไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบแผ่นจับเบต้า คือ ตำแหน่งเลขคลื่น $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนของ N-H stretching ของเส้นใยไหม ตำแหน่งเลขคลื่น $2990-2850\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนของ C-H stretching ของ CH_3 และ CH_2 ตำแหน่งเลขคลื่น $1680-$

1630 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C=O stretching กับ N-H bending ซึ่งเป็นลักษณะแถบการดูดกลืนของหมู่เอไมด์ปฐมภูมิ (Primary amide) ตำแหน่งเลขคลื่น 1513 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C=O stretching และ N-H bending ในหมู่เอไมด์ทุติยภูมิ (Secondary amine) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1160 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C-N stretching

จากการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA กับเส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA เกิดแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1700 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ PHEMA และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1072 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C-O stretching ของหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ PHEMA

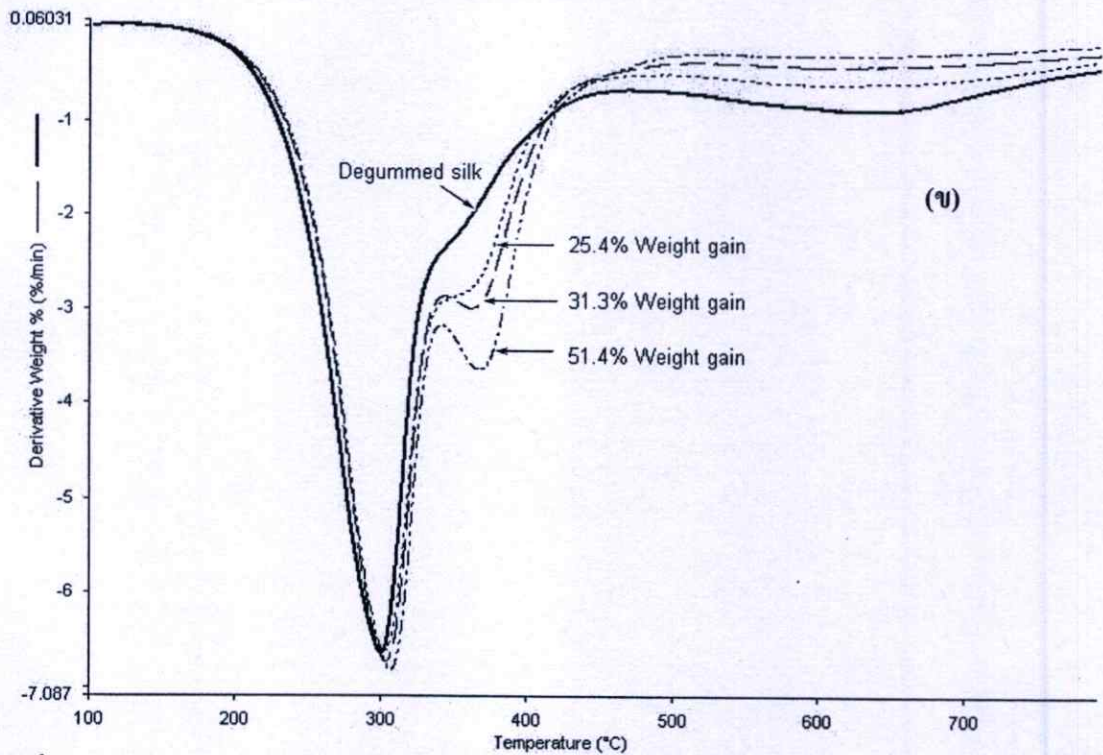
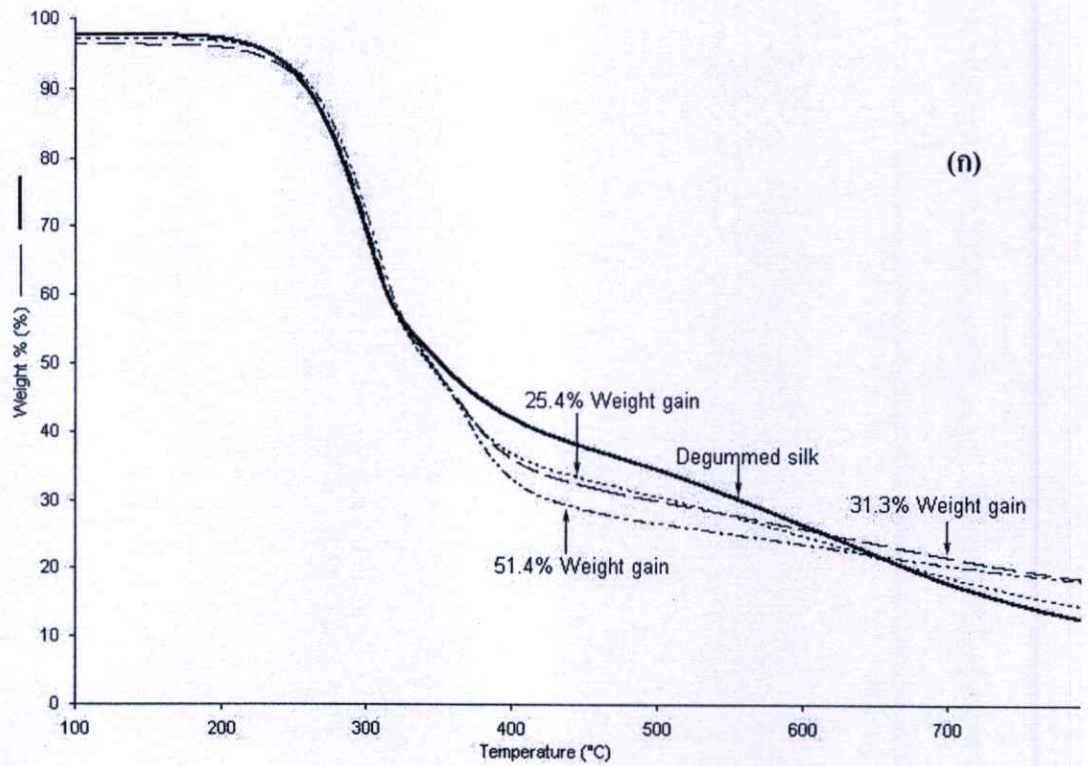
สรุปตำแหน่งอินฟราเรดสเปกตรัมที่สำคัญของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปแถบการดูดกลืนของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ปรากฏในรูปที่ 4.5 [71]

ชนิดของพอลิเมอร์	เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืนของ
ไฟโบรอิน	3500 -3300	N-H stretching
ไฟโบรอิน	2990 – 2850	C-H stretching in $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$
ไฟโบรอิน	1680-1630	C=O stretching and N-H bending in amides (amide I band)
ไฟโบรอิน	1513	C=O stretching and N-H bending in amides (amide II band)
ไฟโบรอิน	1250-1000	C-N stretching
PHEMA 0.2 และ 0.4 M.	1700	C=O stretching in ester
PHEMA 0.2 และ 0.4 M.	1200-1000	C-O stretching in ester

4.4 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของเส้นใยเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญต่อการนำไปใช้งานของเส้นใย ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) เพื่อบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของเส้นใยที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 4.7 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นไหมลอกขาวและเส้นไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นไหมที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งต่างๆ กัน โดย (ก) TGA และ (ข) DTG

จากรูปที่ 4.7 (ก) และตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนระหว่างเส้นใยไหมลอกกาวกับเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงด้วย HEMA พบว่าอุณหภูมิการเริ่มสลายตัว (Onset degradation temperature) ของเส้นใยไหมลอกกาว คือ 255.7°C เส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 25.4% มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 257.6°C และ 351.5°C และเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 31.3% มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 258.2°C และ 352.2°C ส่วนเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 51.4% มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 259.6°C และ 354.9°C ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของไฟโบรอินและ PHEMA ตามลำดับ [56] ดังแสดงในตารางที่ 4.4

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 (ข) และตารางที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (Peak degradation temperature) ของเส้นใยไหมลอกกาว คือ 301.2°C เส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 25.4% มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดที่ 304.1°C และ 362.6°C และเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 31.3% มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดที่ 305.1°C และ 363.6°C ส่วนเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 51.4% มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดที่ 309.0°C และ 369.4°C ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของไฟโบรอินและ PHEMA ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงต่างๆ กัน

น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลง (%)	อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) (Onset degradation temperature)		อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) (Peak degradation temperature)	
	ไฟโบรอิน	HEMA	ไฟโบรอิน	HEMA
-	255.7	-	301.2	-
25.4 ± 2.61	257.6	351.5	304.1	362.6
31.3 ± 1.45	258.2	352.2	305.1	363.6
51.4 ± 0.93	259.6	354.9	309.0	369.4

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นใยไหมเมื่อได้รับความร้อนดังรูปที่ 4.7 (ก) พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเส้นใยเนื่องมาจากความร้อน 2 ช่วง ส่วนเส้นใยไหมที่

ผ่านการตอ้กด้วย HEMA มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเส้นใยอันเนื่องมาจากความร้อน 3 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เป็นความชื้นของเส้นใยไหมที่อุณหภูมิในช่วง 0-100° C ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นจับเบต้าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 256-274° C [50] และช่วงสุดท้ายเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของ HEMA ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 351-355° C

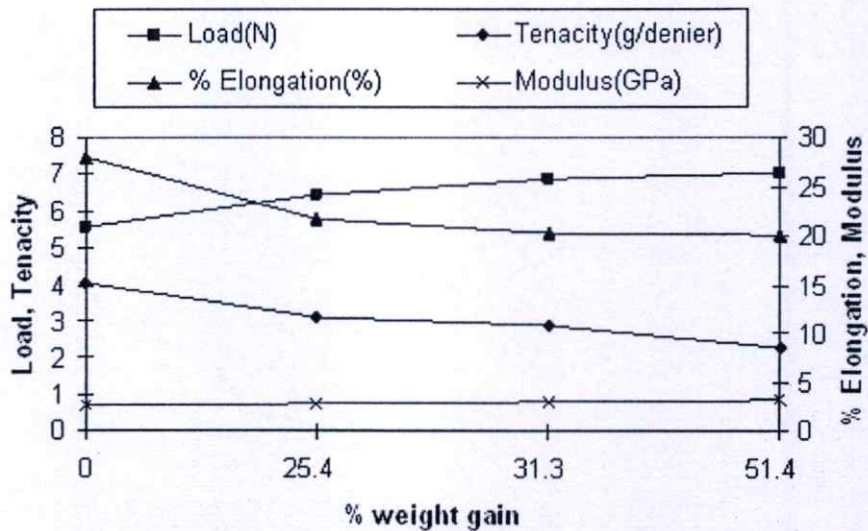
นอกจากนี้พบว่า การตอ้กเส้นใยไหมด้วย HEMA ทำให้เส้นใยไหมมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น โดยพิจารณาจากอุณหภูมิในการสลายตัวของเส้นใยไหมในเทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อน ทั้งนี้เพราะ HEMA เป็นไวนิลมอนอเมอร์ที่มีสายโซ่ข้างเคียงเป็นหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลขึ้นได้ ได้แก่ แรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ้กพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ้กเพิ่มขึ้นเส้นใยไหมมีแนวโน้มของเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงและทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้น

4.5 สมบัติเชิงกล

งานวิจัยในขั้นตอนนี้ศึกษาสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยไหมลอกกวาและเส้นใยไหมที่ตอ้กด้วย HEMA ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ้กเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% โดยศึกษาถึงแรงที่ใช้ในการดึง (Load) โมดูลัส (Modulus) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และเทนacity (Tenacity) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังนี้

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมลอกกวาและเส้นใยไหมที่ตอ้กด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ้กต่างๆ กัน

น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอ้ก (%)	แรงที่ใช้ในการดึง (นิวตัน)	โมดูลัส (จิกะปาสกาล)	การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	เทนacity (กรัม/เดเนียร์)
-	5.53 ± 0.24	2.63 ± 0.14	27.87 ± 2.26	4.02 ± 0.35
25.4 ± 2.61	6.42 ± 0.32	2.90 ± 0.39	21.59 ± 3.28	3.10 ± 0.43
31.3 ± 1.45	6.83 ± 0.98	3.03 ± 0.09	20.24 ± 2.35	2.88 ± 0.51
51.4 ± 0.93	7.04 ± 1.19	3.20 ± 0.04	19.96 ± 2.34	2.27 ± 0.43



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแรงดึงของเส้นใยและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้น หลังการดอ์ก

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล (ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8) พบว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นใยใหม่ ดอ์กด้วย HEMA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยใหม่ลอกขาวและเมื่อเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการดอ์กเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษา นี้แสดงให้เห็นว่าการดอ์กเส้นใยใหม่ด้วย HEMA สามารถปรับปรุงความทนทานต่อแรงดึงให้แก่ เส้นใยใหม่ได้ โดยแรงที่วัดนี้เป็นแรงที่ใช้ดึงให้เส้นใยขาดออกจากกันในทิศทางของแรงดึงซึ่งเป็น ทิศทางตามแนวความยาวของเส้นใยและกระบวนการดอ์กเส้นใยใหม่ด้วย HEMA ทำให้เกิด แรงระหว่างโมเลกุลขึ้น ได้แก่ แรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน แรงดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการ ส่งเสริมแรงของพันธะโควาเลนต์ที่มีอยู่ในสายโซ่หลักของ โปรตีน ดังนั้นเส้นใยใหม่ที่ผ่านการ ดอ์กจึงสามารถทนทานต่อแรงดึงได้มากกว่าเส้นใยใหม่ลอกขาวและเส้นใยใหม่ดอ์กที่มี เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการดอ์กเพิ่มขึ้นสามารถทนทานต่อแรงดังกล่าวได้มากขึ้น

เนื่องจากคาร์ที HEMA ไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบดอ์กกับเส้นใยใหม่ทำให้เกิด เป็นแผ่น โอลิโกเมอร์ของ HEMA เกาะอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยทำให้เส้นใยที่ผ่านการดอ์กมี ความแข็งแรงและมีค่ามอดูลัสสูงกว่าเส้นใยใหม่ลอกขาวดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 นอกจากนี้การเกิด โอลิโกเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยส่งผลให้เกิดการขัดขวางการส่งผ่านแรง ดึงของเส้นใยและทำให้เส้นใยกระจายแรงได้น้อยลง จึงมีความสามารถในการยืดออกลดลงทำให้ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ซึ่งวัดจากระยะทางที่เปลี่ยนแปลงในทิศทางของแรงดึงเทียบกับ ความยาวเริ่มต้นลดลงและมีแนวโน้มลดลงไปตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่ เพิ่มขึ้นหลังการดอ์ก

เมื่อเปรียบเทียบค่าเทนาคิตีของเส้นใยไหมลอกทาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA มีค่าเทนาคิตีต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกทาวเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบเส้นใยไหมตอกลงที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงต่างๆ กันพบว่าเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงมากกว่ามีค่าเทนาคิตีต่ำกว่าเนื่องจากปริมาณของ HEMA ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอกลงมีมากขึ้น ทำให้น้ำหนักของเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น แต่จากการทดสอบแรงที่ใช้ในการดึงให้เส้นใยไหมขาดจากกันพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการดึงมีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราของการเพิ่มน้ำหนักของเส้นใยไหม และเนื่องจากค่าเทนาคิตีเป็นการวัดแรงที่ใช้ดึงต่อน้ำหนักของเส้นใย ดังนั้นเส้นใยไหมตอกลงจึงมีค่าเทนาคิตีต่ำกว่าเส้นใยไหมลอกทาว และเส้นใยไหมตอกลงที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 51.4% มีค่าเทนาคิตีต่ำกว่าที่ 31.3% และ 25.4% ตามลำดับ

4.6 ความคงทนต่อกรดและด่าง

เนื่องจากเส้นใยสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อได้รับสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น กรด หรือด่าง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาความคงทนต่อกรดและด่างของเส้นใยไหมลอกทาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับ เพื่อเป็นประโยชน์ในการดูแลเก็บรักษาและการนำเส้นใยไปทำความสะอาด โดยความคงทนต่อกรดและด่างของเส้นใยไหมหาได้จากความสามารถในการละลายของเส้นใยในกรดและด่าง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเส้นใยหลังการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไปในการละลายกรดและด่างของเส้นใยไหมลอกทาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงต่างๆ กัน

น้ำหนักเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น หลังการตอกลง (%)	น้ำหนักที่หายไป (%)	
	กรด	ด่าง
-	25.29 ± 1.06	17.27 ± 1.92
25.4 ± 2.61	13.12 ± 0.98	12.09 ± 1.78
31.3 ± 1.45	9.68 ± 1.89	6.16 ± 1.46
51.4 ± 0.93	7.01 ± 1.31	4.61 ± 1.27

จากการทดสอบความคงทนต่อกรดของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมทั้งสองชนิดนี้มีส่วนที่สามารถละลายได้ในสารละลายกรด ซึ่งเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปดังตารางที่ 4.6 โดยสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดการขาดออกจากกันของพันธะเพปไทด์ของโปรตีนในเส้นใยไหม [5] ในขณะที่การทดสอบความคงทนต่อด่างของเส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยไหมลอกกาวมีลักษณะฟูขึ้นเล็กน้อยและความมันเงาลดลงเพราะด่างทำให้เส้นใยไหมเกิดการพองตัวและเมื่อเส้นใยไหมแช่อยู่ในสารละลายด่างเป็นเวลานานๆ ส่งผลให้พันธะเพปไทด์ที่ปลายสายโซ่ของโปรตีนเส้นใยไหมเกิดการไฮโดรไลซิส [5] ทำให้ความมันเงาของเส้นใยไหมลดลง

เมื่อพิจารณาความคงทนต่อกรดและด่างของเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาวอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าเส้นใยที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนต่อกรดและด่างมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากการตอกิ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA ทำให้บริเวณอสัณฐาน (Amorphous region) มีความหนาแน่นมากขึ้น สารละลายกรดและด่างจึงแทรกซึมลงไปในเส้นใยไหมตอกิ่งได้ยากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกิ่งเท่ากับ 51.4% มีความคงทนต่อกรดและด่างมากที่สุด สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน คือ การที่มีการตอกิ่งเส้นใยไหมมากๆ นั้น ทำให้เกิดพอลิเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ของ HEMA ขึ้นเป็นแผ่นที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยและทำให้เส้นใยที่บริเวณที่เป็นอสัณฐานมีความหนาแน่นมากขึ้น ดังนั้นสารละลายกรดและด่างจึงแทรกซึมเข้าไปได้ยากที่สุด เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปจึงมีค่าน้อยที่สุด

4.7 ความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใย

งานวิจัยในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาถึงความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกิ่งด้วย HEMA ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกิ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ตามลำดับ โดยเครื่องทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใย (Asano Yarn Friction Tester) ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS L 1095 : 1990 METHOD B โดยขนาดของเส้นใย (Tex) คำนวณได้จากการนำเส้นใยที่ต้องการทดสอบที่มีความยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 3 เส้น ไปดึงให้ตึงด้วยเครื่อง Crimp Tester จากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของเส้นใยทั้ง 3 เส้นรวมกัน เพื่อนำมาคำนวณขนาดของเส้นใยและค่า Tension ดังสมการ

$$\text{ขนาดเส้นใย (Tex)} = \left[\frac{\text{น้ำหนักรวม (กรัม)}}{\text{ความยาวรวม (เมตร)}} \right] \times 1000$$

$$\text{และ Tension (กรัม)} = (\text{Tex}) \times 2 \times \text{จำนวนเส้นใยที่ทำการทดสอบในแต่ละครั้ง (20 เส้น)}$$

ตารางที่ 4.7 จำนวนรอบการขัดถูที่ทำให้เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกลงด้วย HEMA ขาด

น้ำหนักเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น หลังการตอกลง (%)	ขนาดเส้นใย (Tex)	Tension (กรัม)	จำนวนรอบการเสียดทาน ที่ทำให้เส้นใยขาด		
			ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
-	14.17	565	609	112	272
25.4 ± 2.61	16.34	655	1,039	687	828
31.3 ± 1.45	16.73	670	3,902	990	1,621
51.4 ± 0.93	21.50	860	8,223	3,953	6,168

จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบในการเสียดทานที่ทำให้เส้นใยไหมลอกกาวขาดมีค่าต่ำที่สุดและเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 51.4% มีค่าเฉลี่ยจำนวนรอบในการเสียดทานที่ทำให้เส้นใยขาดสูงที่สุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับการทดสอบแรงที่ใช้ในการดึงให้เส้นใยขาดออกจากกัน คือ กระบวนการตอกลงเส้นใยไหมด้วย HEMA ทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุลขึ้นได้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ HEMA ได้แก่ แรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน ซึ่งแรงดังกล่าวนี้สามารถส่งเสริมแรงของพันธะโคเวเลนต์ที่มีอยู่ภายในสายโซ่หลักของโปรตีน ดังนั้นเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงจึงมีความแข็งแรงและสามารถทนทานต่อแรงเสียดทานได้มากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกลงที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงที่สูงขึ้นจึงสามารถทนทานต่อแรงดังกล่าวได้สูงขึ้นเพราะสามารถตอกลงได้มากขึ้นจึงเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากขึ้นดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการตอกลงเส้นใยไหมด้วย HEMA นั้นสามารถปรับปรุงสมบัติความคงทนต่อการขัดถูให้แก่เส้นใยไหมได้

4.8 กระบวนการย้อมสี

ส่วนของการย้อมสีงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการย้อมสีเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกลงด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการตอกลงเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% โดยใช้สีย้อมชนิดต่างๆ ได้แก่ สีย้อมแอมซิด สีย้อมไบเคย สีย้อมไบจีเหล็ก และสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง ซึ่งสารให้สีหลักของไบเคย คือ คลอโรฟิลล์ ทำการย้อมโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับเอทานอลในการสกัด เนื่องจากคลอโรฟิลล์สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ [36] สารให้สีหลักของไบจีเหล็ก คือ บาราคอล [38] ทำการย้อมโดยใช้น้ำในการสกัด [47] และสารให้สีหลักของกาบมะพร้าวแห้ง คือ แทนนิน ทำการย้อมโดยใช้น้ำในการสกัด [45] การย้อมสีด้วยสีย้อมธรรมชาติในงานวิจัยนี้ได้ใช้โพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) ในขณะย้อมด้วย ซึ่งจะช่วยให้สีย้อมธรรมชาติติดบนเส้นใยไหมได้ดีขึ้น

4.8.1 ความสามารถในการย้อมติดสี

ความสามารถในการย้อมติดสีของเส้นใยไหมสามารถพิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของบนเส้นใย (% Dye uptake) ที่ได้จากการนำสารละลายที่ใช้ในการย้อมเส้นใยไหมทั้งก่อนและหลังการย้อมมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงมากที่สุด (λ_{max}) ด้วย UV-Vis Spectrophotometer เพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีของบนเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ดังนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ Dye uptake ของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ

น้ำหนักเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น หลังต่อกิ่ง (%)	Dye uptake (%)				
	สีย้อม แอสิด	สีย้อม กามมะพร้าวแห้ง	สีย้อม ใบเตย	สีย้อม ใบจี้เหล็ก	สีย้อม ใบจี้เหล็ก*
-	72.38	24.81	29.84	41.31	28.86
25.4 ± 2.61	74.82	28.93	47.67	49.16	30.32
31.3 ± 1.45	81.76	33.53	55.60	54.14	35.38
51.4 ± 0.93	84.36	41.30	57.90	55.03	35.47

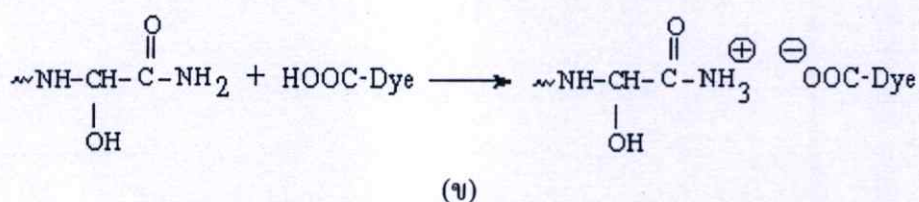
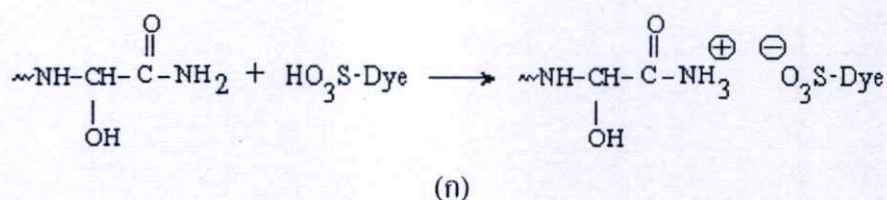
หมายเหตุ : ใบจี้เหล็ก* คือ การย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมใบจี้เหล็กโดยปราศจากการใช้มอร์แดนท์

จากการศึกษาพบว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA สามารถย้อมติดสีย้อมสังเคราะห์และสีย้อมธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมสามารถแทรกซึมเข้าไประหว่างโมเลกุลของเส้นใยได้ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดเล็กกว่าช่องว่าง (Pore) ระหว่างโมเลกุลของเส้นใยจึงเกิดการย้อมติดสีขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพแต่ไม่ทำให้สมบัติทางเคมีของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วสีย้อมจะคงอยู่ภายในเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิกหรือการยึดจับทางกล ดังนี้

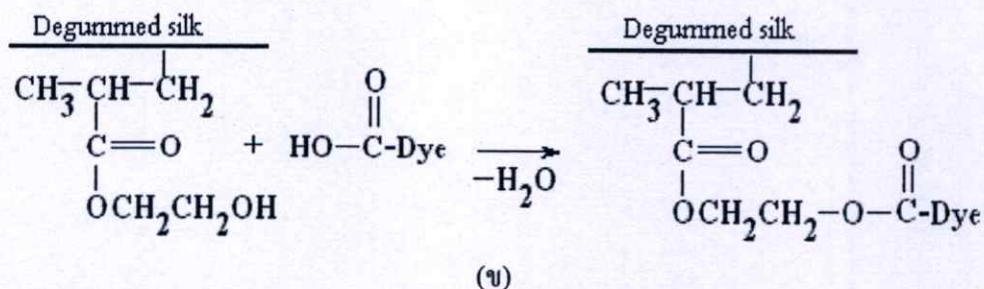
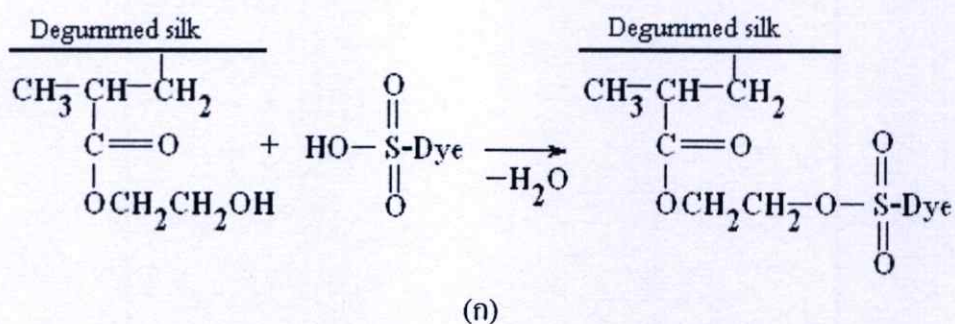
การย้อมติดสีย้อมแอสิด

โมเลกุลของสีย้อมแอสิดจะแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีสภาพความเป็นกรดและส่วนของสีย้อมแอสิดที่แสดงประจุลบหรือแอนไอออนนี่จะเป็นส่วนที่ยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ตำแหน่งที่แสดงความเป็นบวกหรือแคทไอออน ดังนั้นแรงที่ทำให้สีย้อมแอสิดเกิดการยึดติดกับเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA จึงเป็นแรงไอออนิก สำหรับเส้นใยไหมลอกกาวคาดว่าเป็นแรงดึงดูดระหว่างกรดอะมิโนที่เป็นเบสของเส้นใยไหมลอกกาวกับหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3Na$) หรือหมู่คาร์บอกซิล ($COOH$) ของสีย้อมแอสิด

เกิดเป็นแรงไอออนิกขึ้น [11] ดังรูปที่ 4.9 (ก)-(ข) และสำหรับเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA คาดว่า นอกจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่อะมิโนของเส้นใยไหมกับหมู่วงวาของสีย้อมแอซิดดังกล่าวแล้ว ยังสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของสายโซ่ข้างเคียงของ HEMA กับหมู่ซัลโฟเนต (-SO₃Na) หรือหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ของสีย้อมแอซิดเกิดเป็นแรงไอออนิกได้อีกด้วย ดังรูปที่ 4.10 (ก)-(ข)



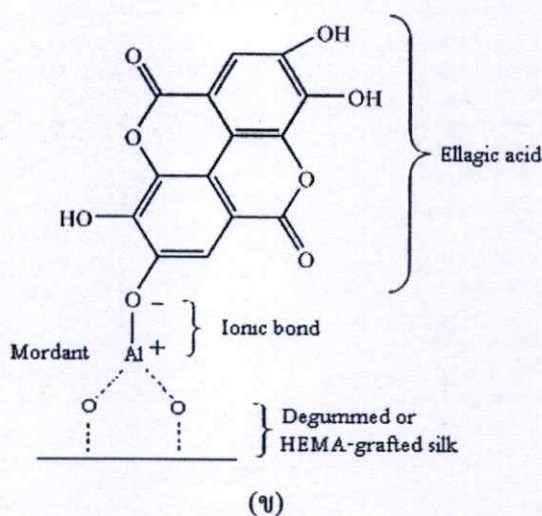
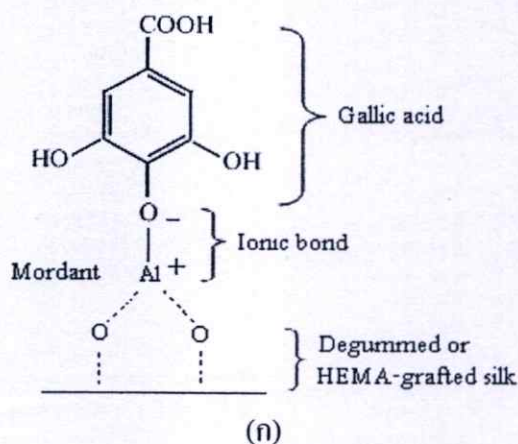
รูปที่ 4.9 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นใน (ก) การย้อมสีเส้นใยไหมลอกกาวด้วยสีย้อมแอซิดที่มีหมู่ซัลโฟเนตและ (ข) การย้อมสีเส้นใยไหมลอกกาวด้วยสีย้อมแอซิดที่มีหมู่คาร์บอกซิล



รูปที่ 4.10 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นใน (ก) การย้อมสีไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ด้วยสีย้อมแอซิดที่มีหมู่ซัลโฟเนตและ (ข) การย้อมสีไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ด้วยสีย้อมแอซิดที่มีหมู่คาร์บอกซิล

การย้อมติดสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง

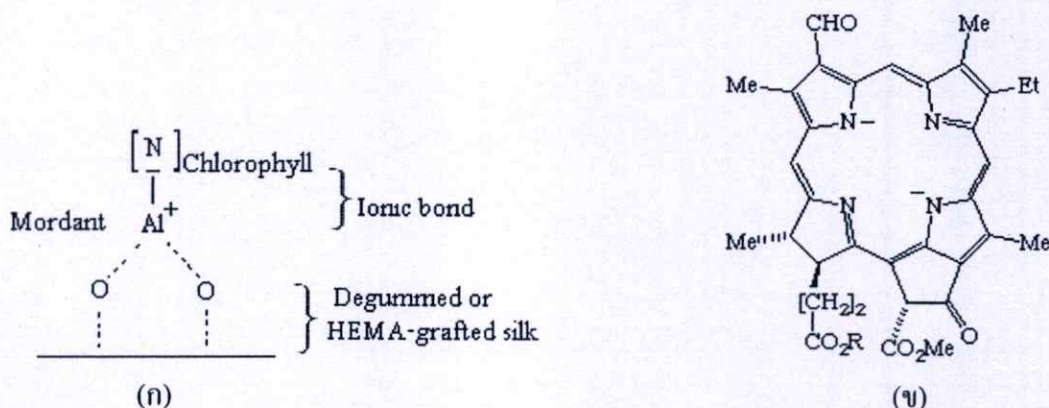
เนื่องจากในขณะที่ทำการย้อมเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA ด้วยสีย้อมธรรมชาติได้มีการเติมสารช่วยติดสีหรือมอร์แดนท์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ได้แก่ สารส้มซึ่งมี pH = 4 ลงไปในน้ำย้อม ดังนั้นจึงเกิดการเหนียวนำทำให้มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าหรือประจุที่มีอยู่ภายในเส้นใยไหมให้มีส่วนที่แสดงความเป็นบวกหรือแคทไอออน (Cation) [24] และเนื่องจากสีย้อมที่ได้จากกาบมะพร้าวแห้งเป็นสีย้อมที่มีสารให้สีหลักเป็นสารประกอบจำพวกแทนนิน [45] ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดแกลลิกและกรดเอลลาจิก เป็นต้น [46] ดังนั้นแรงที่ทำให้สีย้อมเกิดการยึดติดกับเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA จึงเป็นแรงไอออนิก โดยแรงไอออนิกนี้เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยไหมในส่วนที่แสดงความเป็นบวกหรือแคทไอออนกับแอนไอออนของออกซิเจนอะตอมในหมู่ไฮดรอกซิลของแทนนิน ดังรูปที่ 4.11 (ก)-(ข)



รูปที่ 4.11 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสารให้สีหลักในสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง (ก) กรดแกลลิกกับอะลูมิเนียมมอร์แดนท์และเส้นใยไหม (ข) กรดเอลลาจิกกับอะลูมิเนียมมอร์แดนท์และเส้นใยไหม

การย้อมติดสีย้อมไบเบต

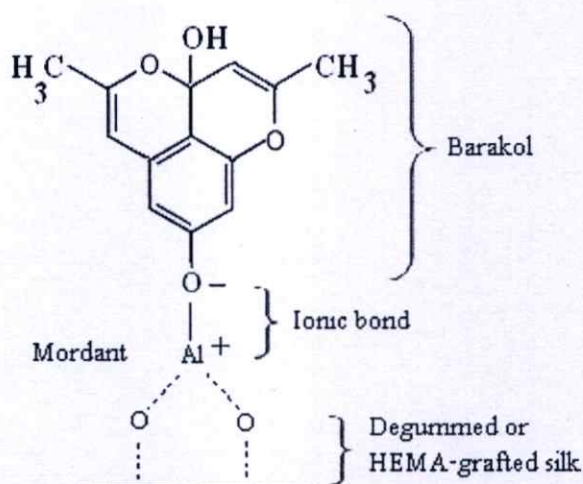
ในระหว่างกระบวนการย้อมเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA ด้วยสีย้อมไบเบตนั้นได้มีการให้ความร้อนประกอบกับการใช้มอร์แดนท์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้คลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นสารให้สีหลักของสีย้อมไบเบตสูญเสียแร่ธาตุแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ออกไปจากโมเลกุล [36] ดังนั้นจึงเกิดแอนไอออนของไนโตรเจนอะตอมขึ้นและแอนไอออนดังกล่าวสามารถไปเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับอะลูมิเนียมมอร์แดนท์และเส้นใยไหมได้ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 (ก) สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสารให้สีหลักในไบเบต (คลอโรฟิลล์) กับอะลูมิเนียมมอร์แดนท์และเส้นใยไหม (ข) โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ที่สูญเสียธาตุแมกนีเซียม (Mg^{2+})

การย้อมติดสีย้อมไบซีเหล็ก

สีย้อมที่ได้จากไบซีเหล็กเป็นสีย้อมที่มีสารให้สีเป็นสีเหลืองเขียวของบาราคอล ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุล [39] ดังนั้นแรงที่ทำให้สีย้อมเกิดการยึดติดกับเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA จึงเป็นแรงไอออนิก โดยแรงไอออนิกนี้เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยไหมในส่วนที่แสดงความเป็นบวกหรือแคทไอออนเมื่อใช้สารส้อมที่มีฤทธิ์เป็นกรดเป็นมอร์แดนท์กับแอนไอออนของออกซิเจนอะตอมในหมู่ไฮดรอกซิลของสีย้อมไบซีเหล็ก ดังรูปที่ 4.13

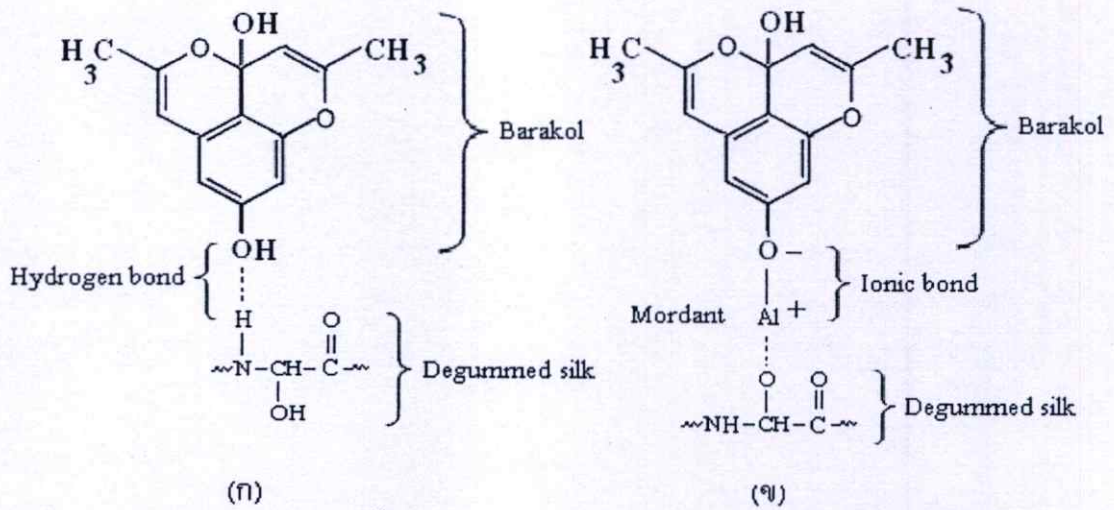


รูปที่ 4.13 สารประกอบเชิงซ้อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างสารให้สีในสีย้อมไบจีเหล็ก (บาราคอล) กับอะลูมิเนียมมอร์แดนท์และเส้นใยไหม

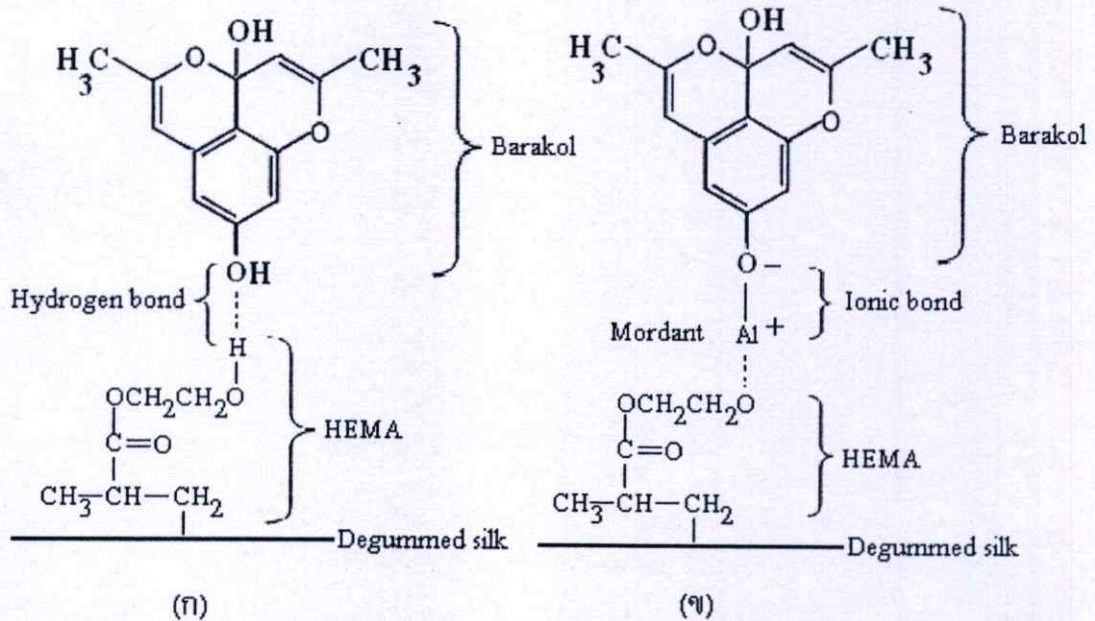
จากการศึกษาการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะย้อมและสีย้อมแอซิด พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมบนเส้นใยสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกวาดังตารางที่ 4.8 เนื่องจากการต่อกิ่งด้วย HEMA นั้นทำให้สายโซ่โปรตีนของเส้นใยไหมมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสีย้อมได้มากขึ้น ดังนั้นเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA จึงมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าเส้นใยไหมลอกกวาดและเมื่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่งเพิ่มขึ้นทำให้หมู่ข้างเคียงที่ว่องไวของ HEMA มีมากขึ้น เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ดังนั้นจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับสีย้อมได้มากขึ้น ทำให้การดูดซับสีย้อมของเส้นใยไหมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่ง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของสารช่วยติดสีหรือมอร์แดนท์ที่มีต่อการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กพบว่าเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะย้อมมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมมากกว่าเส้นใยไหมที่ย้อมโดยปราศจากการใช้มอร์แดนท์อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ามอร์แดนท์สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการย้อมติดสีให้กับเส้นใยไหมได้ โดยมอร์แดนท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สารส้ม ซึ่งมีฤทธิ์หรือแสดงความเป็นกรด ดังนั้นจึงคาดว่าสารส้มนี้จะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าหรือประจุที่มีอยู่ภายในเส้นใยไหมให้แสดงส่วนที่มีความเป็นบวกหรือแคทไอออน [24] โดยอะตอมอะลูมิเนียมของสารส้มจะไปเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับเส้นใยไหมในตำแหน่งที่ว่องไว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล หมู่เอไมด์ เป็นต้น ทำให้เส้นใยไหมมีส่วนที่เป็นแคทไอออน ส่งผลทำให้เส้นใยไหมสามารถเกิดอันตรกิริยาดังแรงไอออนิกกับแอนไอออนของโมเลกุลของสีย้อมไบจีเหล็กได้ ซึ่งต่างจากการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กที่ไม่ได้ใช้มอร์แดนท์คือ แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมไบจีเหล็กกับเส้นใยไหมที่

ไม่ได้ใช้มอร์แดนท์เป็นแรงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4.14-4.15 ซึ่งแรงชนิดนี้เป็นแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อนสามารถถูกทำลายได้ง่ายกว่าแรงไอออนิก



รูปที่ 4.14 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นใน (ก) การย้อมสีเส้นใยไหมลอกกาวด้วยสีข้อมไบจี้เหล็กโดยไม่ใช้มอร์แดนท์และ (ข) การย้อมสีเส้นใยไหมลอกกาวด้วยสีข้อมไบจี้เหล็กโดยใช้มอร์แดนท์



รูปที่ 4.15 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นใน (ก) การย้อมสีเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ด้วยสีข้อมไบจี้เหล็กโดยไม่ใช้มอร์แดนท์และ (ข) การย้อมสีเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ด้วยสีข้อมไบจี้เหล็กโดยใช้มอร์แดนท์

4.8.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี

ในทางอุตสาหกรรมสิ่งทอสามารถบอกความแตกต่างของสีของวัสดุสิ่งทอได้โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมนำมาใช้ในการบอกความแตกต่างของสีตามมาตรฐาน CIELAB ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65/10° ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการวัดสีเพื่อบอกความแตกต่างของสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ทั้งก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ โดยวัดความแตกต่างของสีด้วยระบบ CIE L* a* b* โดยค่า L* แสดงถึงความสว่างของเส้นใย ค่า a* แสดงลักษณะของสีที่ไปยังแสงสีแดงหรือแสงสีเขียว ค่า b* แสดงลักษณะของสีที่ไปยังแสงสีเหลืองหรือแสงสีน้ำเงิน ค่า C* (Chroma) แสดงถึงความสดใสของสีและค่า h° (Hue angle) เป็นตัวเลขที่ระบุว่าสีนั้นมีตำแหน่งอยู่ที่ใด มีหน่วยเป็นองศา ดังรูปที่ 3.3 และผลของการวัดสีต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมแอซิด สีย้อมกามมะพร้าวแห้ง สีย้อมไบเดยและสีย้อมไบจีเหล็ก

ชนิดของสีย้อม	น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังต่อกิ่ง	Color parameter				
		L*	a*	b*	C*	h°
(ก่อนการย้อม)	-	86.44	-0.18	4.11	5.94	85.60
	25.4 ± 2.61	81.96	0.20	4.27	6.32	85.83
	31.3 ± 1.45	80.63	0.00	5.84	6.65	84.99
	51.4 ± 0.93	80.48	0.33	6.00	7.04	85.31
สีย้อมแอซิด	-	29.98	-0.13	13.93	14.58	90.68
	25.4 ± 2.61	21.36	-0.24	12.87	13.39	90.45
	31.3 ± 1.45	20.69	-0.26	12.31	11.65	89.50
	51.4 ± 0.93	16.38	-0.52	11.46	11.84	89.07
สีย้อมกามมะพร้าวแห้ง	-	62.42	6.27	17.63	19.69	69.68
	25.4 ± 2.61	61.60	7.50	18.12	19.59	68.65
	31.3 ± 1.45	59.87	7.36	17.83	21.68	68.40
	51.4 ± 0.93	56.66	7.43	18.25	20.83	68.46

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ชนิดของสีย้อม	น้ำหนักเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น หลังตอ้ง	Color parameter				
		L*	a*	b*	C*	h°
สีย้อมใบเตย	-	65.07	-1.53	23.49	24.91	93.52
	25.4 ± 2.61	61.03	-2.02	23.27	24.04	93.79
	31.3 ± 1.45	57.36	-2.32	23.45	24.24	95.20
	51.4 ± 0.93	55.27	-2.62	23.41	25.00	95.10
สีย้อมใบขี้เหล็ก	-	61.29	-0.05	30.57	29.09	86.64
	25.4 ± 2.61	55.90	-0.12	30.76	29.21	85.22
	31.3 ± 1.45	55.17	-0.19	33.30	29.71	85.02
	51.4 ± 0.93	54.94	-0.76	33.31	30.86	85.25
สีย้อมใบขี้เหล็ก (ไม่ใช้มอร์แดนท์)	-	46.15	-0.45	20.04	18.02	88.85
	25.4 ± 2.61	46.80	-0.71	23.71	21.64	89.17
	31.3 ± 1.45	45.58	-0.98	27.42	22.86	87.03
	51.4 ± 0.93	44.35	-1.57	27.61	20.83	87.87

จากตารางที่ 4.9 เป็นข้อมูลการวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอ้งด้วย HEMA ทั้งก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมแอซิด สีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง สีย้อมใบเตยและสีย้อมใบขี้เหล็ก พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA ก่อนการย้อมมีค่า a* b* C* และ h° ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่าความสว่างของเส้นใย (L*) พบว่าเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA มีความสว่างน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาว และหลังการย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ พบว่าเส้นใยไหมทั้งเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอ้งด้วย HEMA มีความขาวสว่างน้อยลงแต่มีค่าความสดไสของสี (C*) มากขึ้นโดยสีย้อมแอซิด สีย้อมใบเตยและสีย้อมใบขี้เหล็กให้เฉดสีไปทางสีเขียว ส่วนสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งให้เฉดสีไปทางสีน้ำตาล

สีย้อมแอซิด

เมื่อย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมแอซิดพบว่าเส้นใยไหมที่ตอ้งด้วย HEMA มีความสว่างน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาว สีมินิวโน้มไปทางสีเขียวอมน้ำเงินมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวเล็กน้อยและความสดไสของสีน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาว แต่สีอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน

สีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง

เมื่อย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งพบว่าเส้นใยไหมลอกกาบและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA มีค่า a^* b^* C^* และ h° ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่าความสว่างของเส้นใย (L^*) พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีความสว่างน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาบ

สีย้อมใบเตยและสีย้อมใบขี้เหล็ก

เมื่อย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมใบเตยและสีย้อมใบขี้เหล็กพบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีความสว่างน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาบแต่สีมีแนวโน้มไปทางสีเขียวมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาบเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่า b^* หรือลักษณะของสีที่ไปยังแสงสีเหลืองหรือแสงสีน้ำเงินพบว่าเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมใบเตยมีสีที่ไปยังแสงสีเหลืองใกล้เคียงกับเส้นใยไหมลอกกาบแต่เส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กมีสีที่ไปยังแสงสีเหลืองมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาบเล็กน้อย ดังนั้นเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กจึงมีสีเขียวอมเหลืองมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาบเล็กน้อย นอกจากนี้เส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมใบเตยและสีย้อมใบขี้เหล็กมีความสดใสของสีและสีอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับเส้นใยไหมลอกกาบ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กโดยใช้หม้อมอร์แคนท์ในขณะย้อมและไม่ใช้หม้อมอร์แคนท์ พบว่าเส้นใยไหมที่ย้อมโดยใช้หม้อมอร์แคนท์ในขณะย้อมมีความสว่างของสีมากกว่า มีเฉดสีไปทางสีเขียวเหลืองมากกว่าและมีความสดใสของสีมากกว่าเส้นใยไหมที่ย้อมแบบไม่ใช้หม้อมอร์แคนท์ และเมื่อพิจารณาที่ค่า h° หรือตำแหน่งของสีพบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าหม้อมอร์แคนท์มีผลต่อเฉดสีเพียงเล็กน้อยหรือถือได้ว่าเส้นใยไหมที่ย้อมโดยใช้และไม่ใช้หม้อมอร์แคนท์มีเฉดสีเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ พบว่าเส้นใยไหมลอกกาบและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิดมีค่าความสดใสของสีน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาบและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติ เนื่องจากสีย้อมแอซิดมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยไหมมากกว่า HEMA`

ดังนั้นกล่าวโดยสรุปได้ว่าเส้นใยไหมลอกกาบและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA เมื่อนำมาย้อมด้วยสีย้อมแอซิดให้ค่า b^* C^* และ h° เพิ่มขึ้น เมื่อย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งให้ค่า a^* b^* และ C^* เพิ่มขึ้น เมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบเตยให้ค่า b^* C^* และ h° เพิ่มขึ้น และเมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบขี้เหล็กให้ค่า b^* และ C^* เพิ่มขึ้น

4.9 การทดสอบความคงทนของสี

ความคงทนของสีเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณภาพและความสำคัญของสารให้สี โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความคงทนของสีหลังการนำไปซัก ความคงทนของสีต่อแสง ความคงทนของสี

ต่อห้องและความคงทนของสีต่อการขัดถูของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกึ่งเท่ากับ 25.4% 31.3% และ 51.4% ที่ ย้อมด้วยสีย้อมสังเคราะห์ คือ สีย้อมแอซิด และสีย้อมธรรมชาติ คือ สีย้อมกามมะพร้าวแห้ง สีย้อม ไบเคชและสีย้อมใบขี้เหล็ก โดยความคงทนของสีสามารถพิจารณาได้จากระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐาน ดังนี้

4.9.1 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไป

ความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ ย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหลังการทดสอบ โดยผลที่ได้จะถูกประเมินออกมาเป็นตัวเลข โดยการเปรียบเทียบกับเกรย์สเกลสำหรับการ เปลี่ยนแปลงสี ดังนี้

1 สีย้อมแอซิด

ตารางที่ 4.10 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และ เหนือของไหมลอกกาวและไหมต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิด

การทดสอบ Weight gain	ซัก	แสง	สารละลายเหนียวเทียม	
			กรด	ด่าง
ไหมลอกกาว	4-5	>5	4-5	4-5
25.4 %	4-5	>5	4-5	4-5
31.3 %	4-5	>5	4-5	4-5
51.4 %	4-5	>5	4-5	4-5

หมายเหตุ : การทดสอบความคงทนของสีต่อแสงทดสอบโดยการฉายแสงด้วยซินอนอาร์กเป็นเวลา 40 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักในตารางที่ 4.10 พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวที่ ย้อมด้วยสีย้อมแอซิดมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่ดีอยู่แล้ว (ระดับ 4-5 หมายถึง สี เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี) ดังนั้นเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิดจึงมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่ดีเช่นเดียวกับเส้นใยไหม ลอกกาว

สำหรับการประเมินความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกึ่งด้วย HEMA โดยเปรียบเทียบกับผ้าขนสัตว์มาตรฐานสีน้ำเงินที่ย้อมด้วยสีที่มีความคงทนต่อแสงใน

ระดับที่แตกต่างกันไป ซึ่งจัดระดับความคงทนของสีต่อแสงได้ 8 ระดับ รายงานค่าเป็นตัวเลขจาก 1-8 ดังนี้

ระดับ 8	ดียอดเยี่ยม (Superative)
ระดับ 7	ดีเลิศ (Excellent)
ระดับ 6	ดีมาก (Very Good)
ระดับ 5	ดี (Good)
ระดับ 4	ดีปานกลาง (Fairly Good)
ระดับ 3	ปานกลาง (Fair)
ระดับ 2	คุณภาพต่ำ (Poor)
ระดับ 1	คุณภาพต่ำมาก (Very Poor)

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงในตาราง 4.10 พบว่าเส้นใยไหมที่เชื่อมด้วยสีแอซิดมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับที่มากกว่า 5 (มากกว่า “ดี”) เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วภายในโมเลกุลของสีแอซิดมีทั้งวงอะโรมาติก (Aromatic ring) และระบบคอนจูเกต (Conjugate system) ที่เสถียรดังรูปที่ 2.14 ทำให้เมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสงอิเล็กทรอนิกส์ (Electron) ภายในวงอะโรมาติกและภายในระบบคอนจูเกตสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ (Delocalize) ดังนั้นเส้นใยไหมที่เชื่อมด้วยสีแอซิดจึงมีความคงทนของสีต่อแสงมาก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีเชื่อมแอซิดที่เชื่อมติดบนเส้นใยไหมต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่าง โดยประเมินจากการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นใยไหมหลังการทดสอบ พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากเส้นใยไหมลอกกาวที่เชื่อมด้วยสีเชื่อมแอซิดมีความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับที่คืออยู่แล้ว (ระดับ 4-5 หมายถึง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี) ดังนั้นเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีเชื่อมแอซิดจึงมีความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับที่ดีเช่นเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว

2 สีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง

ตารางที่ 4.11 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง

การทดสอบ Weight gain	ซัก	แสง	สารละลายเหงื่อเทียม	
			กรด	ด่าง
ไหมลอกกาว	4	4-5	4-5	4-5
25.4 %	4	5	4-5	4-5
31.3 %	4	5	4-5	4-5
51.4 %	4	5	4-5	4-5

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักในตารางที่ 4.11 โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นใยไหมหลังการซัก พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวที่ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่คืออยู่แล้ว (ระดับ 4 หมายถึง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย) ดังนั้นเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งจึงมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่ดีเช่นเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว

เมื่อพิจารณาความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งพบว่ามี ความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เนื่องจากสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งมีสารให้สีหลัก คือ แทนนิน [45] ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) ที่ประกอบไปด้วย วงอะโรมาติกหรือวงเบนซีน (Benzene ring) อยู่เป็นจำนวนมาก [46] ดังนั้นเมื่อได้รับการกระตุ้น จากพลังงานแสงอิเล็กทรอนิกส์ภายในวงอะโรมาติกสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้รอบวง ดังนั้นเส้นใย ไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งจึงมีความเสถียรต่อแสงและเมื่อพิจารณาผลของการตอกิ่ง เส้นใยไหมด้วย HEMA ที่มีต่อความคงทนของสีต่อแสงพบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ที่ ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งมีระดับความคงทนของสีต่อแสงสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว โดย คาดว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสีย้อม กาบมะพร้าวแห้งมากกว่าหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไหมลอกกาว จึงทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA กับสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งมากกว่าแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างโมเลกุลของเส้นใยไหมลอกกาวกับสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง ดังนั้นเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งจึงมีความคงทนของสีต่อแสงมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีของสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งที่ย้อมติดบน เส้นใยไหมต่อสารละลายเหงื่อที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่าง โดยการประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของ

เส้นใยไหมหลังการทดสอบ พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีระดับความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองทั้งในสถานะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ย้อมด้วยสีย้อมกามะพร้าวแห้งมีความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับที่คืออยู่แล้ว (ระดับ 4-5 หมายถึง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี)

3 สีย้อมใบเตย

ตารางที่ 4.12 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และ เหมียงของไหมลอกกาวและไหมต่อกึ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมใบเตย

การทดสอบ Weight gain	ซัก	แสง	สารละลายเหลืองเทียม	
			กรด	ด่าง
ไหมลอกกาว	4	2-3	4-5	4-5
25.4 %	4	2-3	4-5	4-5
31.3 %	4	2-3	4-5	4-5
51.4 %	4	2-3	4-5	4-5

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักในตารางที่ 4.12 โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นใยไหมหลังการซัก พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวที่ย้อมด้วยสีย้อมใบเตยมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่คืออยู่แล้ว (ระดับ 4 หมายถึง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย) ดังนั้นเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกึ่งด้วย HEMA จึงมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่ดีเช่นเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว

เมื่อพิจารณาความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมใบเตยพบว่ามีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับ 2-3 ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่ต่ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ โดยคลอโรฟิลล์เมื่อได้รับแสงและออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาในรูปของออกซิเดชันและรีดักชันระหว่างพลังงานจากแสงกับคลอโรฟิลล์ ดังนั้นสีเขียวของคลอโรฟิลล์จึงซีดจางลงและทำให้คืนกลับไม่ได้ [36] รงควัตถุคลอโรฟิลล์ของสีย้อมใบเตยจึงมีความไวต่อแสงมาก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีย้อมใบเตยที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างโดยการประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นใยไหมหลังการทดสอบ พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกึ่งด้วย HEMA มีระดับความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองทั้งในสถานะที่เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากเส้นใยไหม

ลอกกาวที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบเทตมีความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างอยู่ในระดับที่ดีอยู่แล้ว (ระดับ 4-5 หมายถึง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี)

4 สีย้อมไบซีเหล็ก

ตารางที่ 4.13 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และเหงื่อของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบซีเหล็กโดยใช้เมอร์แคนท์

การทดสอบ Weight gain	ซัก	แสง	สารละลายเหลืองเทียม	
			กรด	ด่าง
ไหมลอกกาว	4-5	3-4	4	4
25.4 %	4-5	3-4	4-5	4-5
31.3 %	4-5	3-4	4-5	4-5
51.4 %	4-5	3-4	4-5	4-5

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักในตารางที่ 4.13 โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นใยไหมหลังการซัก พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบซีเหล็กมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่ดีอยู่แล้ว (ระดับ 4-5 หมายถึง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี) ดังนั้นเส้นใยไหมที่ผ่านการตอกิ่งด้วย HEMA จึงมีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับที่ดีเช่นเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว

เมื่อพิจารณาความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบซีเหล็ก พบว่ามีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดีปานกลาง (ระดับ 3-4)

นอกจากนี้เมื่อทำการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมไบซีเหล็กโดยใช้เมอร์แคนท์ในขณะย้อม จากนั้นนำมาทดสอบความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่าง ได้ผลดังตารางที่ 4.13 พบว่าสีย้อมไบซีเหล็กที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีการเปลี่ยนแปลงของสีหลังการทดสอบน้อยกว่าสีย้อมไบซีเหล็กที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมลอกกาวหรืออาจกล่าวได้ว่าเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบซีเหล็กมีระดับความคงทนของสีต่อสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสีย้อมไบซีเหล็กมากกว่าหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไหมลอกกาว จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA กับสีย้อมไบซีเหล็กมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเส้นใยไหมลอกกาวกับสีย้อมไบซีเหล็ก

ดังนั้นเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีข้อมไบจีเหล็กจึงมีความคงทนของสีต่อสารละลาย
 เหมอที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างมากกว่า จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

ตารางที่ 4.14 ระดับสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก แสง และ
 เหมอของไหมลอกกาวและไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีข้อมไบจีเหล็กโดยใช้
 และไม้ใช้มอร์แดนท์

การทดสอบ Weight gain	ซัก	แสง	สารละลายเหมอเทียม	
			กรด	ด่าง
เมื่อใช้มอร์แดนท์				
ไหมลอกกาว	4-5	3-4	4	4
25.4 %	4-5	3-4	4-5	4-5
31.3 %	4-5	3-4	4-5	4-5
51.4 %	4-5	3-4	4-5	4-5
ไม้ใช้มอร์แดนท์				
ไหมลอกกาว	3-4	2-3	4	4
25.4 %	3-4	2-3	4	4
31.3 %	3-4	2-3	4	4
51.4 %	3-4	2-3	4	4

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของสารช่วยติดสีหรือมอร์แดนท์ที่มีต่อการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีข้อม
 ไบจีเหล็กพบว่าเส้นใยไหมที่เชื่อมด้วยสีข้อมไบจีเหล็กโดยไม้ใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมมีการ
 เปลี่ยนแปลงของสีหลังการซักเล็กน้อยถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ระดับ 4-5) แต่การย้อมที่ไม้ใช้
 มอร์แดนท์พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีหลังการซักพอสังเกตได้ถึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (ระดับ
 3-4) กล่าวคือ การย้อมเส้นใยไหมด้วยสีข้อมไบจีเหล็กโดยไม้ใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมมีการ
 เปลี่ยนแปลงของสีหลังการซัคน้อยกว่าการย้อมโดยไม้ใช้มอร์แดนท์ เนื่องจากมอร์แดนท์ที่ใช้ใน
 งานวิจัยนี้ คือ สารส้มซึ่งเป็นอะลูมิเนียมมอร์แดนท์ สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับเส้นใยไหมและ
 โมเลกุลของสีข้อมไบจีเหล็กได้โดยอาศัยแรงหรือพันธะไฮออนิก ดังนั้นการใช้มอร์แดนท์ในขณะที่
 ย้อมจึงทำให้โมเลกุลของสีข้อมไบจีเหล็กยึดติดกับเส้นใยไหมได้ดีกว่า คงทนกว่าและแข็งแรงกว่า
 การย้อมที่ไม้ใช้มอร์แดนท์ เนื่องจากการย้อมที่ไม้ใช้มอร์แดนท์แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่าง
 เส้นใยไหมกับสีข้อมไบจีเหล็กเป็นแรงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4.14-4.15 ซึ่งแรงชนิดนี้

เป็นแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อนสามารถถูกทำลายได้ง่ายจากสารละลายผงซักฟอก ทำให้สีซีดจางลงได้ง่ายกว่า จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสีหลังการซักมากกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมอร์แดนท์ที่มีต่อความคงทนของสีต่อแสงของเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมใบจีเหล็ก พบว่าเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมใบจีเหล็ก โดยใช้มอร์แดนท์ ในขณะที่ย้อมมีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดีปานกลาง (ระดับ 3-4) แต่การย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์มีความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (ระดับ 2-3) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ามอร์แดนท์ที่นำมาใช้เป็นสารช่วยติดสีในการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมใบจีเหล็ก สามารถช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อแสงให้แก่เส้นใยไหมได้ เนื่องจากอะลูมิเนียมมอร์แดนท์สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับเส้นใยไหมและ โมเลกุลของสีย้อมใบจีเหล็ก ได้โดยอาศัยพันธะไฮดรอกซิลซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงและเสถียรต่อแสงกว่าพันธะไฮโดรเจนของการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมใบจีเหล็กที่ไม่ใช้มอร์แดนท์ ดังรูปที่ 4.14-4.15 ดังนั้นการใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมใบจีเหล็กทำให้ โมเลกุลของสีย้อมใบจีเหล็กคงทนต่อแสงได้ดีกว่าการไม่ใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมและจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้เส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมใบจีเหล็กโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมมีความคงทนของสีต่อสารละลายเหงื่อที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างสูงกว่าการย้อมที่ไม่ได้ใช้มอร์แดนท์ด้วย

4.9.2 ค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐาน

นอกจากความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ของเส้นใยไหมลอกขาวและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA จะสามารถประเมินได้จากการพิจารณาที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบแล้ว ยังสามารถประเมินได้จากค่าการเปื้อนของสีบนผ้าขาวมาตรฐานที่นำมาใช้ในการประกบชิ้นงานทดสอบซึ่งประกอบด้วยผ้าฝ้ายและผ้าไหมมาตรฐาน โดยผลที่ได้จะถูกประเมินออกมาเป็นตัวเลขโดยการเปรียบเทียบกับเกรย์สเกลสำหรับการเปื้อนติดสีบนผ้าขาวมาตรฐาน ดังนี้

ตารางที่ 4.15 ค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐานของไหมลอกขาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ หลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักและเหงื่อ

สีย้อม	Weight gain (%)	สีติดติดผ้าฝ้ายมาตรฐาน			สีติดติดผ้าไหมมาตรฐาน		
		การซัก	เหงื่อกรด	เหงื่อด่าง	การซัก	เหงื่อกรด	เหงื่อด่าง
แอสซิด	ไหมลอกขาว	4	4-5	4-5	4	4-5	4-5
	25.4 %	4	4-5	4	4	4-5	3-4
	31.3 %	4	4-5	4	4	4-5	3-4
	51.4 %	4	4-5	3-4	4	4-5	3-4

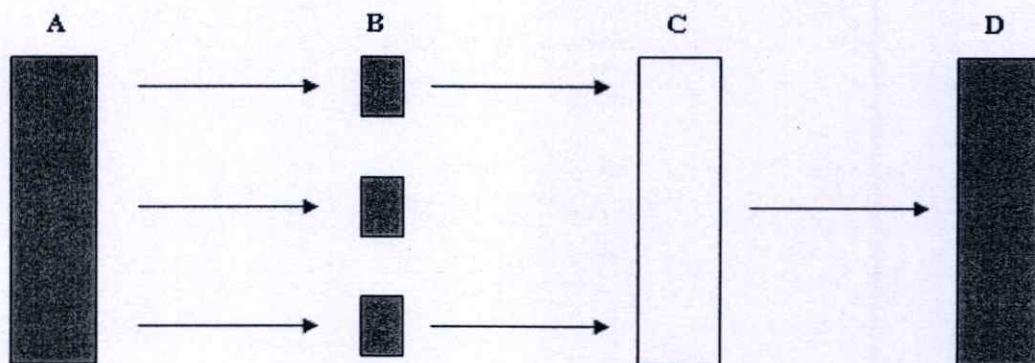
ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

สีย้อม	Weight gain (%)	สีตกติดผ้าฝ้ายมาตรฐาน			สีตกติดผ้าไหมมาตรฐาน		
		การซัก	เหงื่อกรด	เหงื่อด่าง	การซัก	เหงื่อกรด	เหงื่อด่าง
กามมะพร้าวแห้ง	ไหมลอกขาว	4	4	4	4	4	4
	25.4 %	4	4	4	4	4	4
	31.3 %	4	4	4	4	4	4
	51.4 %	4	4	4	4	4	4
ใบเคย	ไหมลอกขาว	4	4	4	4	4	4
	25.4 %	4	4	4	4	4	4
	31.3 %	4	4	4	4	4	4
	51.4 %	4	4	4	4	4	4
ใบชี้เหล็ก ใช้มอร์แดนท์	ไหมลอกขาว	4	4	3-4	4	3	3
	25.4 %	4	4	3-4	4	3	3
	31.3 %	4	4	3-4	4	3	3
	51.4 %	4	4	3-4	4	3	3
ใบชี้เหล็ก ไม่ใช้มอร์แดนท์	ไหมลอกขาว	3-4	3-4	3-4	3-4	3	3
	25.4 %	3-4	3-4	3-4	3-4	3	3
	31.3 %	3-4	3-4	3-4	3-4	2-3	2-3
	51.4 %	3-4	3-4	3-4	3-4	2-3	2-3

จากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าการเปื้อนของสีย้อมแอซิดบนผ้าขาวมาตรฐานเนื่องจากสารละลายเหงื่อที่มีฤทธิ์เป็นด่างของเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA ที่มีค่าต่ำกว่าหรือสีตกติดที่ผ้าขาวมาตรฐานมากกว่าเส้นใยไหมลอกขาวและมีแนวโน้มตกติดที่ผ้าฝ้ายมาตรฐานมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ในการตอถึง เนื่องจากสีย้อมแอซิดที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA มีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าเส้นใยไหมลอกขาว (พิจารณาจากค่า % Dye uptake) ดังนั้นเมื่อนำมาทดสอบด้วยสารละลายเหงื่อที่มีฤทธิ์เป็นด่างสีย้อมแอซิดที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมตอถึงด้วย HEMA นี้จึงมีโอกาสหลุดออกจากเส้นใยได้มากกว่าเส้นใยไหมลอกขาว ด้วยเหตุนี้สีย้อมแอซิดจึงตกติดที่ผ้าขาวมาตรฐานได้มากกว่าเส้นใยไหมลอกขาว โดยการหลุดออกของสีย้อมแอซิดนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของสารละลายด่างสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลโฟนิลหรือหมู่คาร์บอกซิลของสีย้อมแอซิดได้

เมื่อพิจารณาค่าการเปื้อนของสีบนผ้าฝ้ายและผ้าไหมมาตรฐานหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก พบว่าเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมใบชี้เหล็กโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะย้อมมีค่าการ

เป็นสปีบนผ้าขาวมาตรฐานทั้งผ้าฝ้ายและผ้าไหมอยู่ในระดับที่ 4 คือ สีดกติดเล็กน้อย แต่เมื่อย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์พบว่ามีการเป็นสปีบนผ้าขาวมาตรฐานทั้งผ้าฝ้ายและผ้าไหมอยู่ในระดับ 3-4 คือ สีดกติดพอสังเกตเห็นได้ถึงสีดกติดเล็กน้อย ดังนั้นการใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมทำให้สีย้อมไบจีเหล็กติดที่ผ้าขาวมาตรฐานน้อยกว่า เนื่องจากอะลูมิเนียมมอร์แดนท์สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับเส้นใยไหมและ โมเลกุลของสีย้อมไบจีเหล็กได้โดยอาศัยแรงหรือพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นการใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมจึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมไบจีเหล็กยึดติดกับเส้นใยไหมได้ดีกว่า คงทนกว่าและแข็งแรงกว่าการย้อมที่ไม่ได้ใช้มอร์แดนท์ เนื่องจากการย้อมที่ไม่ได้ใช้มอร์แดนท์แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยไหมกับสีย้อมไบจีเหล็กเป็นแรงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4.14-4.15 ซึ่งแรงชนิดนี้เป็นแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อนสามารถถูกทำลายได้ง่ายจากสารละลายผงซักฟอก ทำให้สีย้อมไบจีเหล็กหลุดออกมาจากเส้นใยไหมไปตกติดที่ผ้าขาวมาตรฐานได้ง่าย โดยกลไกของสีดกติดบนผ้าขาวมาตรฐานในระหว่างการซักสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กลไกของสีดกติดบนผ้าขาวมาตรฐานในระหว่างการซัก โดย A คือ เส้นใยที่ย้อมสี : B คือ สีที่หลุดออกมา : C คือ ผ้าขาวมาตรฐานและ D คือ ผ้าขาวมาตรฐานที่สีดกใส่ [25]

จากรูปที่ 4.16 แสดงกลไกของสีที่ตกติดบนผ้าขาวมาตรฐานในระหว่างการซัก โดยสีย้อมจะหลุดออกมาจากเส้นใยไปสู่ น้ำซึ่งเป็นตัวกลางก่อน จากนั้นสีย้อมเหล่านี้จะไปเกาะติดบนผ้าขาวมาตรฐานผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ ทำให้ผ้าขาวมาตรฐานมีสีที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการป้องกันสีดกนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกการป้องกันไม่ให้สีหลุดจากเส้นใยที่ย้อมและวิธีที่สองการคัดแปลงสีที่หลุดออกมาอยู่ในน้ำไม่ให้อาจกลับไปที่เกาะติดผ้าได้ ซึ่งผู้ผลิตผงซักฟอกจะมุ่งเน้นที่วิธีที่สองนี้เป็นหลัก โดยสีที่หลุดออกมาจากเส้นใยนี้อาจถูกทำให้อยู่ในสารละลายอย่างเสถียร ถูกทำลายลงหรือถูกบังคับให้ไปเกาะติดวัสดุอื่นที่ใช้ป้องกันการตกติดของสปีบนผ้า [25]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการเป็นของสีย้อมไบจีเหล็กบนผ้าฝ้ายมาตรฐาน เนื่องจากสารละลายเหลืองที่มีฤทธิ์เป็นกรดระหว่างเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็ก โดยใช้และไม่ใช้มอร์แดนท์ ดังตารางที่ 4.15 พบว่าเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กที่มีการใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมมีค่าการเป็นของสปีบนผ้าฝ้ายมาตรฐานอยู่ในระดับที่สูงกว่าการย้อมที่ไม่ใช้มอร์แดนท์

กล่าวคือ เส้นใยไหมที่เชื่อมด้วยสีย้อมโบซี่เหล็กโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมมีสีเป็นอนคกติดที่ ผ้าฝ้ายมาตรฐานน้อยกว่าการย้อมที่ไม่ใช้มอร์แดนท์ ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลได้ในทำนองเดียวกับ ผลของค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวมาตรฐานหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

ตารางที่ 4.16 ค่าการเปื้อนสีบนผ้าขาวแห้งและผ้าขาวเปียกของไหมลอกกาวและไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ หลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

ชนิดของสีย้อม	Weight gain (%)	สีตกติดผ้าขาวแห้ง (ระดับ)	สีตกติดผ้าขาวเปียก (ระดับ)
สีย้อมแอซิด	ไหมลอกกาว	4-5	4
	25.4 %	4-5	4
	31.3 %	4-5	4
	51.4 %	4-5	4
สีกาบมะพร้าวแห้ง	ไหมลอกกาว	4-5	4-5
	25.4 %	4-5	4-5
	31.3 %	4-5	4-5
	51.4 %	4-5	4-5
สีย้อมโบเตย	ไหมลอกกาว	3	3
	25.4 %	4	4
	31.3 %	4	4
	51.4 %	4	4
โบซี่เหล็ก ใช้มอร์แดนท์	ไหมลอกกาว	4-5	4
	25.4 %	4-5	4
	31.3 %	4-5	4
	51.4 %	4-5	4
โบซี่เหล็ก ไม่ใช้มอร์แดนท์	ไหมลอกกาว	4	3-4
	25.4 %	4	3-4
	31.3 %	4	3-4
	51.4 %	4	3-4

การทดสอบนี้เป็นการประเมินความคงทนของสีต่อการซักทั้งในสภาวะแห้งและเปียกของ เส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA โดยพิจารณาจากสีที่ติดบนผ้าขาวแห้งและ ผ้าขาวเปียกที่ใช้ในการซัก ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จะถูกประเมินออกมาเป็นตัวเลขโดยการ เปรียบเทียบกับเกรย์สเกลสำหรับการเปื้อนติดสี ได้ผลดังตารางที่ 4.16

จากตารางที่ 4.16 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีย้อมแอซิดที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมต่อการขจัดพบว่าสีย้อมแอซิดมีความคงทนต่อการขจัดในสภาวะแห้งมากกว่าสภาวะเปียก เนื่องจากการขจัดในสภาวะเปียกนั้นเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิดจะถูกขจัดด้วยผ้าขาวเปียก ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจากผ้าขาวเปียกสามารถแทรกซึมเข้าไปละลายโมเลกุลของสีย้อมแอซิดซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำอยู่ คือ หมู่ไฮดรอกซิล ทำให้โมเลกุลของสีย้อมแอซิดหลุดออกมาและเปื้อนติดบนผ้าขาวเปียกได้ ดังนั้นสีย้อมแอซิดที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมจึงมีความคงทนต่อการขจัดในสภาวะแห้งมากกว่าสภาวะเปียก

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีย้อมแอซิดและสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียกของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนของสีต่อการขจัดอยู่ในระดับเดียวกับเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ย้อมด้วยสีย้อมแอซิดและสีย้อมกาบมะพร้าวแห้งมีความคงทนของสีต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียกคืออยู่แล้ว

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความคงทนของสีย้อมไบเคซที่ข้อมติดบนเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียก โดยประเมินการเปื้อนของสีย้อมไบเคซบนผ้าขาวแห้งและผ้าขาวเปียกที่นำมาใช้ในการขจัด ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 4.16 พบว่าเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนของสีต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียกอยู่ที่ระดับ 4 หมายถึง สีตกติดเล็กน้อย แต่เส้นใยไหมลอกกาวมีความคงทนของสีต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียกอยู่ที่ระดับ 3 หมายถึง สีตกติดพอสังเกตเห็นได้ ดังนั้นเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA ที่ข้อมด้วยสีย้อมไบเคซมีสีเปื้อนตกติดบนผ้าขาวแห้งและผ้าขาวเปียกน้อยกว่าเส้นใยไหมลอกกาว เนื่องจากการตอกิ่งเส้นใยไหมด้วย HEMA ทำให้เส้นใยไหมมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสีย้อมไบเคซมากกว่าหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไหมลอกกาว จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเส้นใยไหมที่ตอกิ่งด้วย HEMA กับสีย้อมไบเคซมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเส้นใยไหมลอกกาวกับสีย้อมไบเคซ ดังนั้นเส้นใยไหมตอกิ่งด้วย HEMA ที่ข้อมด้วยสีย้อมไบเคซจึงมีความคงทนของสีต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียกสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาว

เมื่อศึกษาอิทธิพลของมอร์แดนท์ที่มีต่อการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กพบว่าเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะที่ย้อมมีความคงทนของสีต่อการขจัดทั้งในสภาวะแห้งและเปียกมากกว่าการย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมอร์แดนท์สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับเส้นใยไหมและ โมเลกุลของสีย้อมไบจีเหล็กได้โดยอาศัยพันธะไอออนิกซึ่งมีความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนของการย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กที่ไม่ใช้มอร์แดนท์ ดังรูปที่ 4.14-4.15 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ามอร์แดนท์ที่นำมาใช้เป็นสารช่วยติดสีในการย้อมเส้นใยไหม

ด้วยสีข้อมไบจีเหล็กสามารถช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อการขูดทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะเปียกให้แก่เส้นใยไหมได้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความคงทนของสีข้อมไบจีเหล็กที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมต่อการขูดพบว่าสีข้อมไบจีเหล็กมีความคงทนต่อการขูดในสภาวะแห้งมากกว่าสภาวะเปียก เนื่องจากการขูดในสภาวะเปียกเส้นใยไหมที่ย้อมด้วยสีข้อมไบจีเหล็กจะถูกขูดด้วยผ้าขาวเปียก ดังนั้น โมเลกุลของน้ำจากผ้าขาวเปียกสามารถแทรกซึมเข้าไปละลาย โมเลกุลของสีข้อมไบจีเหล็กซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำอยู่ คือ หมู่ไฮดรอกซิล ทำให้โมเลกุลของสีข้อมไบจีเหล็กหลุดออกมาและเปื้อนติดบนผ้าขาวเปียกได้ ดังนั้นสีข้อมไบจีเหล็กที่ย้อมติดบนเส้นใยไหมจึงมีความคงทนต่อการขูดในสภาวะแห้งมากกว่าสภาวะเปียก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ลักษณะวิทยาและการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเส้นใย

เส้นใยไหมลอกกาวมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ มีความมันเงานุ่มนวล แต่เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีลักษณะแข็งกระด้างและมีพื้นผิวที่ขรุขระ โดยเส้นใยไหมที่มีเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งมากที่สุดมีพื้นผิวที่ขรุขระและแข็งกระด้างมากที่สุดและจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA เกิดแถบการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1700 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ PHEMA และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1072 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ C-O stretching ของหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่ข้างเคียงของ PHEMA

5.1.2 สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางเคมีของเส้นใย

เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้นจากเส้นใยไหมลอกกาวและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนต่อกรดและด่างสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาวและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่ง

5.1.3 สมบัติเชิงกลและความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใย

แรงที่ใช้ในการดึงให้เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาวและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่ง นอกจากนี้พบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งมีความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสสูงกว่าเส้นใยไหมลอกกาวแต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่าเทนาซีตีลดลง โดยมีแนวโน้มลดลงไปตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งและจากการทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของเส้นใยพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนต่อการขัดถูมากกว่าเส้นใยไหมลอกกาวและมีแนวโน้มความคงทนต่อการขัดถูมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่ง

5.1.4 ความสามารถในการย้อมติดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ของเส้นใย

เส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA สามารถย้อมติดสีได้ดีกว่าเส้นใยไหมลอกกาวและมีแนวโน้มย้อมติดสีได้มากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่ง โดยเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ย้อมติดสีแอซิดได้ดีที่สุด รองลงมา คือ สีย้อมใบจีเหล็ก สีย้อมใบเคยและสีย้อมกาบมะพร้าวแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA ที่ย้อมด้วย สีย้อมต่างๆ มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในระดับเดียวกันและเมื่อเปรียบเทียบกับ

เส้นใยไหมลอกกาวพบว่าเส้นใยไหมที่ต่อกิ่งด้วย HEMA มีความคงทนของสีต่อแสงสูงขึ้นเมื่อย้อมด้วยสีย้อมกามมะพร้าวแห้ง มีความคงทนของสีต่อเหงื่อสูงขึ้นเมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบจี้เหล็กและมีความคงทนของสีต่อการขัดถูสูงขึ้นเมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบเตย

5.1.5 อิทธิพลของมอร์แดนท์ที่มีต่อการย้อมติดสีและความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ

เมื่อย้อมเส้นใยไหมด้วยสีย้อมใบจี้เหล็กโดยใช้และไม่ใช้มอร์แดนท์พบว่าเส้นใยไหมมีการดูดซับสีย้อม มีความคงทนของสีต่อการซัก แสง เหงื่อและการขัดถูมากกว่าการย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนท์ ดังนั้นมอร์แดนท์หรือสารส้มที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการย้อมเส้นใยไหมเมื่อย้อมด้วยสีย้อมใบจี้เหล็กได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการนำสารให้สีจากธรรมชาติชนิดอื่นๆ มาใช้ในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหม เช่น ขนุน (*Artocarpus heterophyllus*) โดยแก่นของขนุนมีสารโมริน (Morin) ที่ให้สีเหลือง ซึ่งสามารถย้อมผ้าฝ้ายและผ้าไหมได้ [33]

5.2.2 ศึกษาการนำสารช่วยติดสีหรือมอร์แดนท์ที่ได้จากพืชชนิดต่างๆ มาใช้ในกระบวนการย้อมเส้นใยไหม เช่น ส้มแขก (*Garcinia atroviridis*) ซึ่งผลของส้มแขกสามารถใช้เป็นตัวช่วยให้สีติดแน่นทนทานในการย้อมผ้าไหม หรือมะขาม (*Tamarindus indica*) โดยเนื้อของมะขามสามารถใช้เป็นตัวช่วยให้สีย้อมติดแน่นทนทานได้เช่นเดียวกัน [33]

5.2.3 ศึกษาอิทธิพลของมอร์แดนท์ที่มีต่อการตกติดกลับ (Restaining) ของสีชนิดอื่นๆ ที่นำมาทำการซักรวมกัน

5.2.4 ศึกษาค่าสี ($L^* a^* b^* C^*$ และ h°) ก่อนและหลังการทดสอบความคงทนของสีต่อสภาวะต่างๆ ของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมต่อกิ่งด้วย HEMA

เอกสารอ้างอิง

- [1] กุลชล บุญสวัสดิ์. “สมบัติทางกายภาพและสมบัติการย้อมติดสีของไหมต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและเมทิลเมทาคริเลต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [2] จิราธร บุญญา. “สมบัติทางกายภาพและสมบัติการย้อมติดสีของเส้นใยไหม (*Bombyx mori*) ที่ต่อกิ่งด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและไวนิลไตร-2-เมทอกซีเอทอกซีไซเลน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [3] MTEC, NSTDA. “คอนแทกเลนส์ทำจากวัสดุชนิดใด.” [Online]. Available : http://www.mtec.or.th/th/news/q_a/qa23.html. 2008.
- [4] จุลไหมไทย. “ไหมและสายพันธุ์ไหม” *Colour way*. vol. 11, no. 58. May 2005. pp. 56-57.
- [5] สิริรัตน์ จารุจินดา. “ไหม : การลอกกาวไหมและการฟอกขาวไหม” *Colour way*. vol. 10, no. 56. Jan. 2005. pp. 34-38.
- [6] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [7] อภิชาติ สนธิสมบัติ. กระบวนการเคมีสิ่งทอ. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 2543.
- [8] นवलแข ปาลิวนิช. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย (ฉบับปรับปรุงใหม่). กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2542.
- [9] อัจฉราพร ไสละสูต. ความรู้เรื่องผ้า. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : สร้างสรรค์-วิชาการ. 2539.
- [10] สมหญิง ชูประยูร. “เส้นทางสายไหม” *Colour way*. vol. 10, no. 56. Jan. 2005. pp. 14-16.
- [11] มินากาวะ โมโตอิ. วิทยาการไหม เล่ม 1 แปลโดย เข็มชัย เหมะจันทร์ และเออีอิชิ คาวาอิ. กรุงเทพฯ : คณะกรรมการส่งเสริมสินค้าไหมไทย กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. 2530.
- [12] M. Tsukada, M. Nagura, H. Ishikawa and H. Shiozaki. “Structural Characteristics of Silk Fibers Treated with Epoxides” *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 43, issue 4. August 1991. pp. 643-649.
- [13] P. Munk. *Introduction to Macromolecular Science*. Singapore : John Wiley & Sons. 1990.

- [14] จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร. เส้นใยและสิ่งทอ. กรุงเทพฯ : เอกสารประกอบการสอนวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอชั้นสูง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] สิริรัตน์ จารุจินดา. “ไหม : การลอกกาวยไหมและการฟอกขาวไหม” *Colour way*. vol. 10, no. 57. March 2005. pp. 41-44.
- [16] M. Tsukada. “Studies on Some Physical Properties and Structural Characteristics of Methyl Methacrylate–Grafted Silk Fiber” *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 35, issue 4. March 1988. pp. 965-972.
- [17] M. Tsukada, G. Freddi, Y. Ishiguro and H. Shiozaki. “Structural Analysis of Methacrylamide Grafted Silk Fibers” *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 50, issue 9. December 1993. pp. 1519-1527.
- [18] T. Arai, H. Inshikawa, G. Freddi, S. Winkler and M. Tsukada. “Chemical Modification of *Bombyx mori* Silks using Isocyanate” *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 79, issue 10. March 2001. pp. 1756-1763.
- [19] มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [20] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โอเคียนสตรี. 2527.
- [21] J. M. G. Cowie. *Polymer Chemistry & Physics of Modern Materials*. 2nd ed. London : Chapman & Hall. 1997.
- [22] ปรีชา พหลเทพ. โพลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2544.
- [23] ลีลี่ โกศัยยานนท์. คู่มือวิชาการสิ่งทอ. กรุงเทพฯ : ทีทีไอเอส. 2541.
- [24] อัจฉราพร ไสละสูต. คู่มือการย้อมสี. กรุงเทพฯ : อักษรบัณฑิต. 2517.
- [25] อังคณา อมรศรี. “การป้องกันสีตกระหว่างการซัก” *Colour way*. vol. 7, no. 34. May 2001. pp. 43-46.
- [26] สิริวรรณ กิตตินาวรัตน์. “สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyes)” *Colour way*. vol. 12, no. 69. March 2007. pp. 39-41.
- [27] สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. “การย้อมสีสิ่งทอที่ใช้วัสดุจากธรรมชาติ” *เทคโนโลยี*, vol. 20, no. 3. July 1999. pp. 29-32.

- [28] นฤมล ศรพันธ์. “การใช้สารช่วยติดในการย้อมไหมด้วยขมิ้นชัน.” วิทยานิพนธ์คหกรรม-
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาคหกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
2533.
- [29] นนทลี ชินวงศ์อมร. “จลนพลศาสตร์และผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย้อมสีไหม
ด้วยสีครั้ง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2543.
- [30] อนันต์เสวก เท่วซึ่งเจริญ. **คู่มือย้อมสีธรรมชาติ ฉบับชาวบ้าน สีเขียว สีน้ำตาล และสีดำ.**
เชียงใหม่ : หน่วยพิมพ์เอกสารวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2543.
- [31] นฤมล ศิริทรงธรรม. “การย้อมสีเส้นไหม” **Colour way.** no. 57. March. 2005. pp. 32-33.
- [32] J. Koh, G. Sim and J. Kim. “pH Control in the Dyeing of Polyamide with Acid Dyes”
Coloration Technology. vol. 117, 2001. pp. 156-160.
- [33] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด, สุนทร คุริยะประพันธ์, ทักษิณ อาชวาคม, สายันต์ ต้นพานิช, ชลธิชา
นิวาสประภฤติ และปริยานันท์ ศรีสูงเนิน. **ทรัพยากรพืชในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
ลำดับที่ 3 : พืชที่ให้สีย้อมและแทนนิน.** กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์. 2544.
- [34] สุชาติ จุลพูล. “ไหมป่าอีรี่” **Colour way.** vol. 10, no. 56. Jan. 2005. pp. 23-26.
- [35] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. “เคยหอม.” [Online]. Available :
<http://www.tistr.or.th/pharma/Pandanus%20odorus.htm>. 2007.
- [36] นิธิยารัตนาปนนท์. **เคมีอาหาร.** กรุงเทพฯ : โอ. เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์. 2545.
- [37] สำนักงานข้อมูลสมุนไพร มหาวิทยาลัยมหิดล. “จีเหิล็ก.” [Online]. Available :
<http://www.medplant.mahidol.ac.th/pubhealth/..%5Cpubhealth%5Ccassiasi.html>. 2007.
- [38] M. Sukma, C. Chaichantipyuth, Y. Murakami, M. Tohda, K. Matsumoto and H. Watanabe.
“CNS Inhibitory Effects of Barakol, A Constituent of *Cassia siamea* Lamk.” **Journal of
Ethnopharmacology.** vol. 83, 2002. pp. 87-94.
- [39] W. Thongsaard, S. Chainakul, G.W. Bennett and C.A. Marsden. “Determination of Barakol
Extracted from *Cassia siamea* by HPLC with Electrochemical Detection” **Journal of
Pharmaceutical and Biomedical Analysis.** vol. 25, 2001. pp. 853-859.
- [40] W. Thongsaard, C. Deachapunya, S. Pongsakorn, E.A. Boyd, G.W. Bennett and C.A.
Marsden. “Barakol : A Potential Anxiolytic Extracted from *Cassia siamea*”
Pharmacology Biochemistry and Behavior. vol. 53, 1996. pp. 753-758.

- [41] B.W. Bycroft. "The Structure and Synthesis of Barakol : A Novel Dioxaphenalene Derivative from *Cassia siamea*" **Journal of Chemical Society.** vol. 12, 1970. pp. 1686-1689.
- [42] ชัยโย ชัยชาญทิพยุทธ. "การศึกษาทางพฤกษเคมีของใบจีเห่ล็กและใบจีเห่ล็กอเมริกัน" วิทยานิพนธ์เภสัชศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเภสัชเวท บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2522.
- [43] A. Hassanali-Walji, T. J. King, S. C. Wallwork. "Barakol, a Novel Dioxaphenalene Derivative from *Cassia siamea*" **Journal of the Chemical Society, Chemical Communications.** vol. 12, 1969. pp. 678.
- [44] สำนักงานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. "มะพร้าว." [Online]. Available : <http://www.medplant.mahidol.ac.th/pharm/botanic.asp?bc=0518>. 2007.
- [45] ศันสนีย์ คำบุญชู, อนันต์เสวก เห่าซึ่งเจริญ, นงคราญ ไชยวงศ์, นิตยา มหาไชยวงศ์ และดวง พุทธศุภร์. "การย้อมด้วยฝ้ายด้วยสีน้ำตาลจากสีย้อมธรรมชาติ." [Online]. Available : http://www.scisoc.or.th/stt/28/web/content/C_03/C10.htm. 2007.
- [46] อ้อมบุญ ถ้วนรัตน์. การสกัดและตรวจสอบสารสำคัญจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ : บทที่ 9 การตรวจสอบแทนนินและโพลีฟีนอล. กรุงเทพฯ : คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2536.
- [47] อนันต์เสวก เห่าซึ่งเจริญ, ศันสนีย์ คำบุญชู, นงคราญ ไชยวงศ์, นิตยา มหาไชยวงศ์ และดวง พุทธศุภร์. "การย้อมสีเขียวบนผ้าฝ้ายด้วยสีย้อมธรรมชาติ." [Online]. Available : http://www.scisoc.or.th/stt/28/web/content/T_20/T05.htm. 2007.
- [48] ลลิตา บุญโถม. "สมบัติทางกายภาพและการข้อมติคดีของเส้นใยไหมที่ทำการต่อกึ่งกับ ไวนิลมอโนเมอร์." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [49] วัฒนา คล้ายรัศมี. "การปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมโดยวิธีการต่อกึ่งกับไวนิลมอโนเมอร์ในเอทานอลและน้ำ." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [50] H. Zhang, J. Magoshi, M. Becker, J. Y. Chen, R. Matsunaga. "Thermal Properties of *Bombyx mori* Silk Fibers" **Journal of Applied Polymer Science.** vol. 86, issue 8. November 2002. pp. 1817-1820.
- [51] M. L. Gulrajani, S. Sinha and S. Gupta. "Some Studies in Degumming of Silk with Organic acid" **Journal of The Society of Dyers and Colourists.** vol. 108, 1992. pp. 79-86.

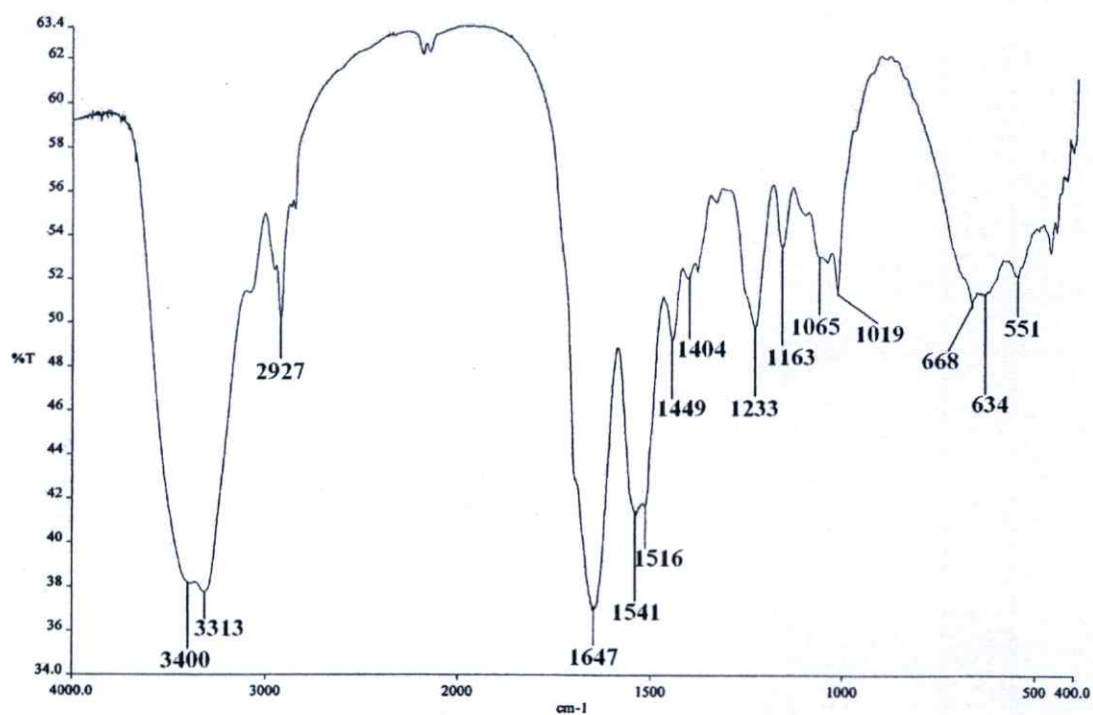
- [52] S. Chopra, R. Chattopadhyay and M.L. Gulrajani. "Low Stress Mechanical Properties of Silk Fabric degummed by Difference Methods" **Journal of Textile Institute**. vol. 87, 1995. pp. 542-543.
- [53] P. Jiang, H. Liu, C. Wang, L. Wu, J. Huang and C. Guo. "Tensile Behavior and Morphology of Differently Degummed Silkworm (*Bombyx mori*) Cocoon Silk Fibres" **Materials Letters**. vol. 60, issue 7. April 2006. pp. 919-925.
- [54] M. Tsukada, G. Freddi, M. Matsumura, H. Shiozaki and N. Kasai. "Physical Properties and Dyeability of Silk Fibers Modified with Ethoxyethylmethacrylate Polymer" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 44, issue 5. Feb. 1992. pp. 799-805.
- [55] M. Tsukada, Y. Goto, G. Freddi and H. Shiozaki. "Chemical Modification of Silk with Aromatic acid anhydrides" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 45, issue 7. July 1992. pp. 1189-1194.
- [56] M. Tsukada, G. Freddi, P. Monti, A. Bertoluzza and H. Shiozaki. "Physical Properties of 2-Hydroxyethyl Methacrylate-Grafted Silk Fibers" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 49, issue 10. September 1993. pp. 1835-1844.
- [57] M. Tsukada, T. Arai, S. Winkler, G. Freddi and H. Ishikawa. "Physical Properties of Silk fibers Grafted with Vinyltrimethoxysilane" **Journal of Applied Polymer Science**. vol.79, issue 10. March 2001. pp. 1764-1770.
- [58] M. Tsukada, T. Arai, G. Freddi, T. Imai and N. Kasai. "Grafting Vinyl Monomers onto Silk (*Bombyx mori*) Using Different Initiators : Properties of Grafted Silk" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 81, issue 6. August 2001. pp. 1401-1409.
- [59] G. Freddi, M. R. Massafra, S. Beretta, S. Shibata, Y. Gotoh, H. Yasui and M. Tsukada. "Structure and Properties of *Bombyx mori* Silk Fibers Grafted with Methacrylamide (MMA) and 2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA)" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 60, issue 11. June 1996. pp. 1867-1876.
- [60] T. K. Maji, D. Basu, C. Datta and A. Banerjee. "Studies of Mechanical and Moisture Regain Properties of Methyl Methacrylate Grafted Silk Fibers" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 84, issue 5. May 2002. pp. 969-974.
- [61] R. Ojah and S. K. Dolui. "Graft Copolymerization of Methyl methacrylate onto *Bombyx mori* Initiated by Semiconductor-based Photocatalyst" **Bioresource Technology**. vol. 97, issue 13. September 2006. pp. 1529-1535.

- [62] T. Arai, G. Freddi, R. Innocenti, D. L. Kaplan, M. Tsukada. "Acylation of Silk and Wool with Acid anhydrides and Preparation of Water-repellent Fibers" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 82, issue 11. December 2001. pp. 2832-2841.
- [63] T. Arai, G. Freddi, R. Innocenti, M. Tsukada. "Biodegradation of *Bombyx mori* Silk Fibroin Fibers and Films" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 91, issue 4. Feb. 2004. pp. 2383-2390.
- [64] P. Jiang, H. Liu, C. Wang, L. Wu, J. Huang, C. Guo. "Tensile Behavior and Morphology of Differently Degummed Silkworm (*Bombyx mori*) Cocoon Silk Fibres" **Materials Letters**. vol. 60, 2006. pp. 919-925.
- [65] P. S. Vankar, R. Shanker, A. Verma. "Enzymatic Natural Dyeing of Cotton and Silk Fabrics without Metal Mordants" **Journal of Cleaner Production**. vol. 15, 2007. pp. 1441-1450.
- [66] S. Rodrigues, G. Pinto. "Ultrasound Extraction of Phenolic Compounds from Coconut (*Cocos nucifera*) Shell Powder" **Journal of Food Engineering**. vol. 80, 2007. pp. 869-872.
- [67] S. Rodrigues, G. Pinto, F. Fernandes. "Optimization of Ultrasound Extraction of Phenolic Compounds from Coconut (*Cocos nucifera*) Shell Powder by Response Surface Methodology" **Ultrasonics Sonochemistry**. vol. 15, 2008. pp. 95-100.
- [68] A. Kojthung, P. Meesilpa, B. Sudatis, L. Treeratanapiboon. "Effects of Gamma Radiation on Biodegradation of *Bombyx mori* Silk Fibroin" **International Biodeterioration & Biodegradation**. 2008. pp. 1-4.
- [69] D. L. Dunaway, B. L. Thiel and C. Viney. "Tensile Mechanical Property Evaluation of Natural and Epoxide-treated Silk Fibers" **Journal of Applied Polymer Science**. vol. 58, issue 3. October 1995. pp. 675-683.
- [70] ASTM D276-98. "Standard Test Method for Identification of Fiber in Textiles" Philadelphia : **American Society for Testing and Materials**. 1999.
- [71] Lin-Vien D., N.B. Colthup, W.G. Fateley, and J.G. Grasselli. **The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules**. New York : Academic Press. 1999.
- [72] ข้อมูลจากบริษัท Modern Dyestuffs & Pigments จำกัด

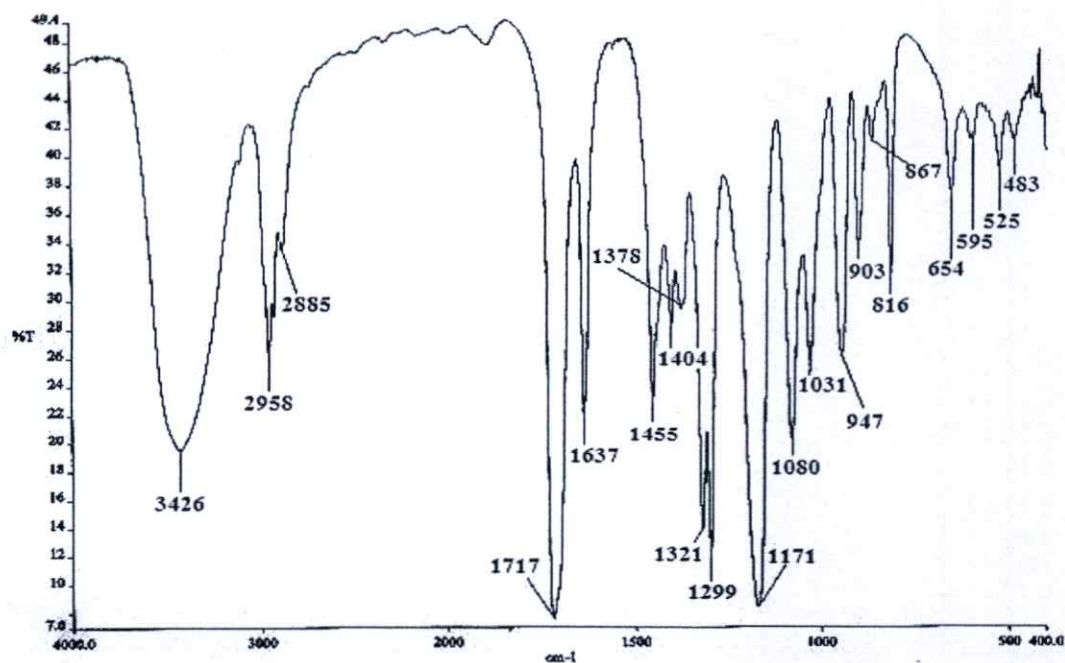
- [73] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [74] Athlone Extrusions. "Colour." [Online]. Available : <http://www.athloneextrusions.ie/athlone/colours/colour.php>. 2008.

ภาคผนวก ก.

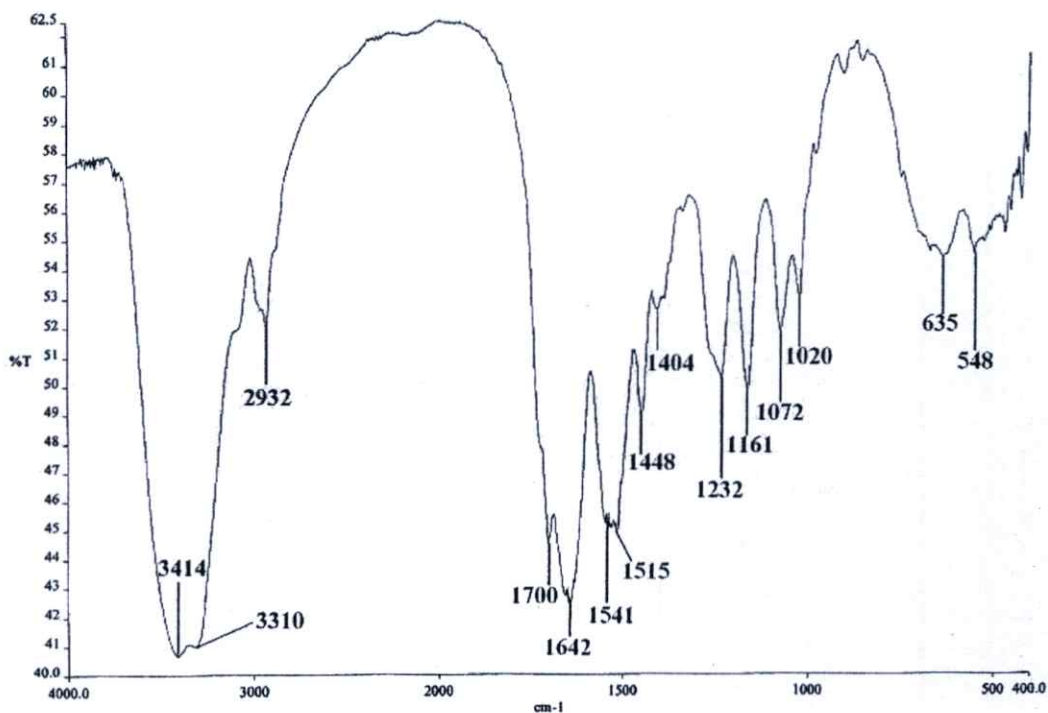
อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหม



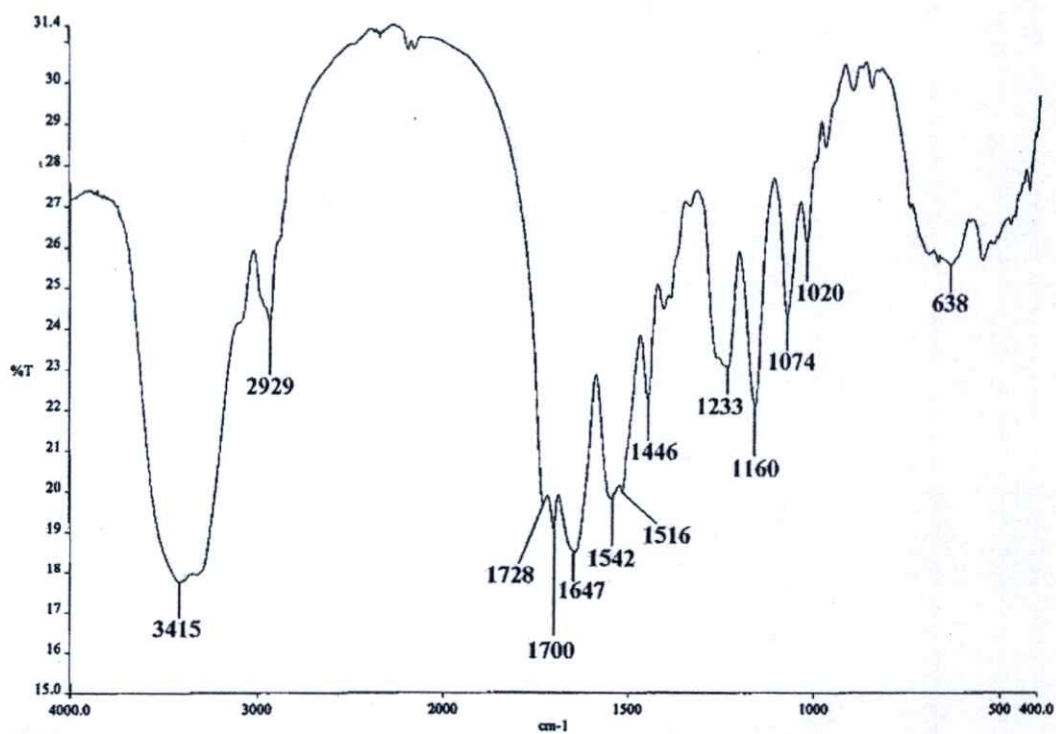
รูปที่ ก-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาว



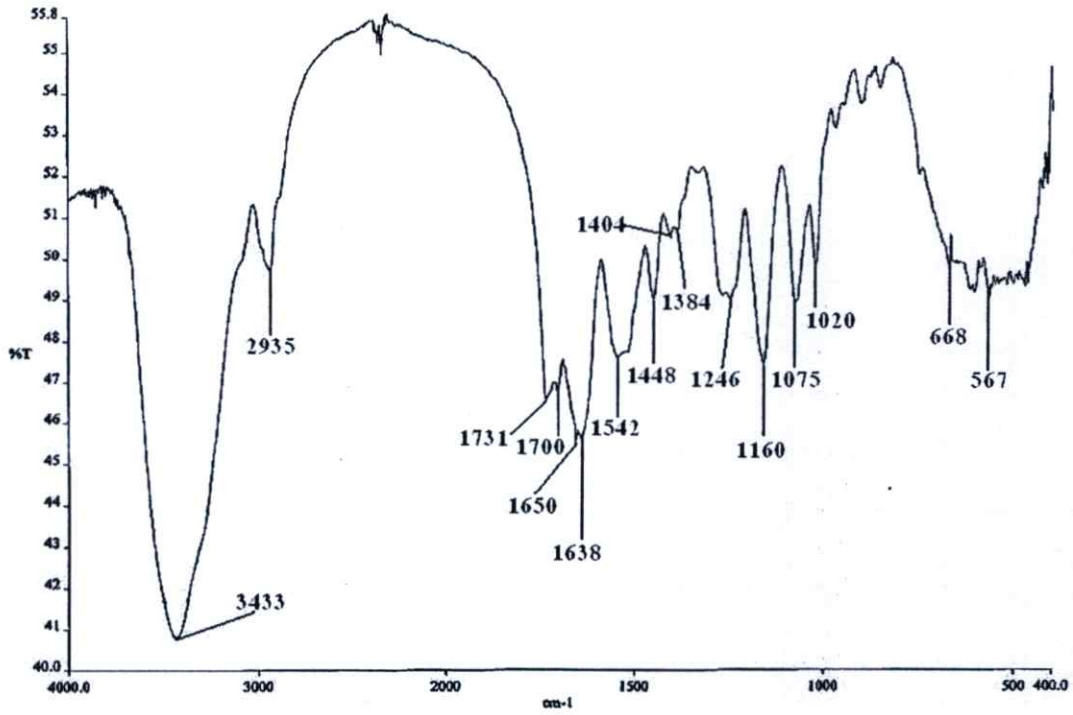
รูปที่ ก-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA)



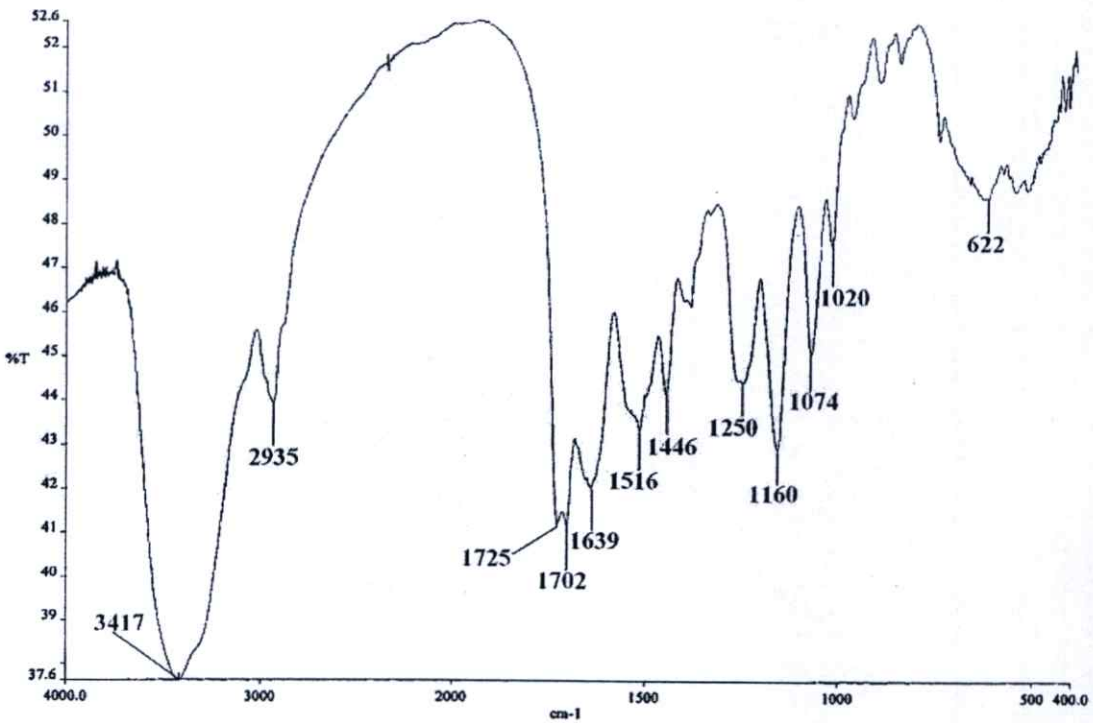
รูปที่ ก-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังการต่อกิ่ง 51.4%



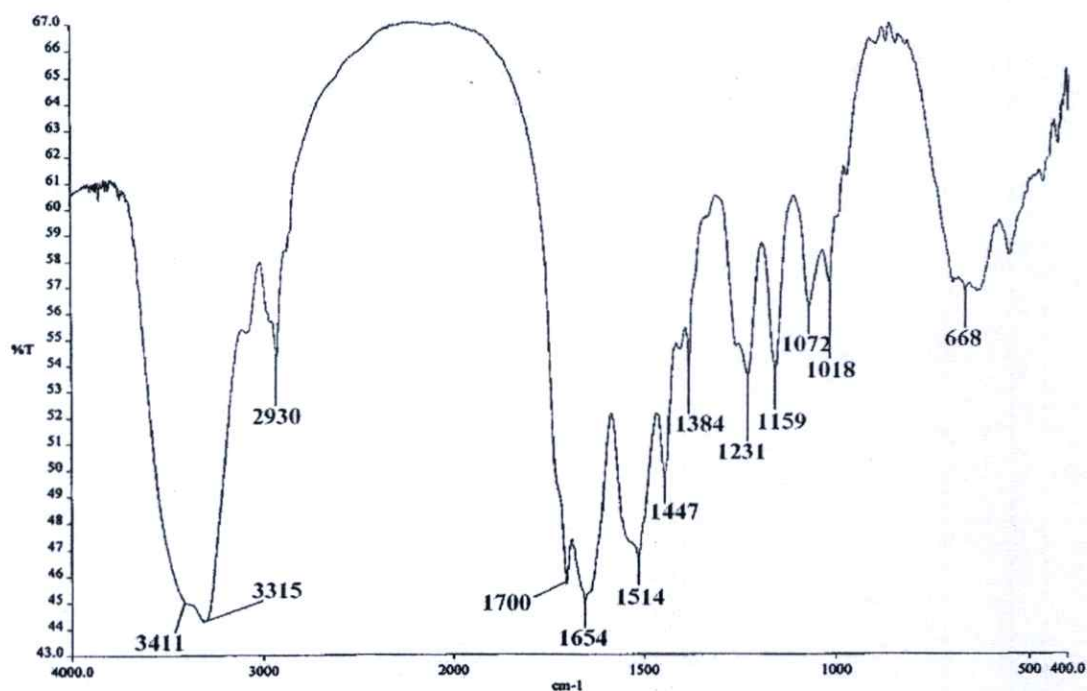
รูปที่ ก-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกิ่งด้วย HEMA และเมอ์แดนท์



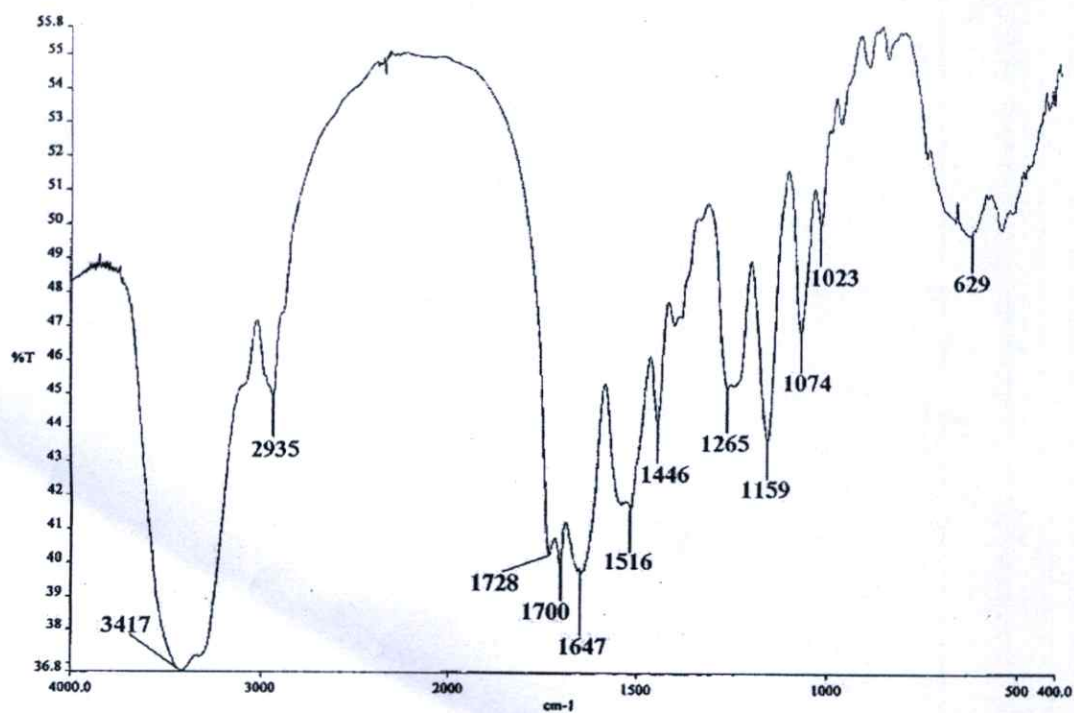
รูปที่ ก-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีเชื่อมแอซิด



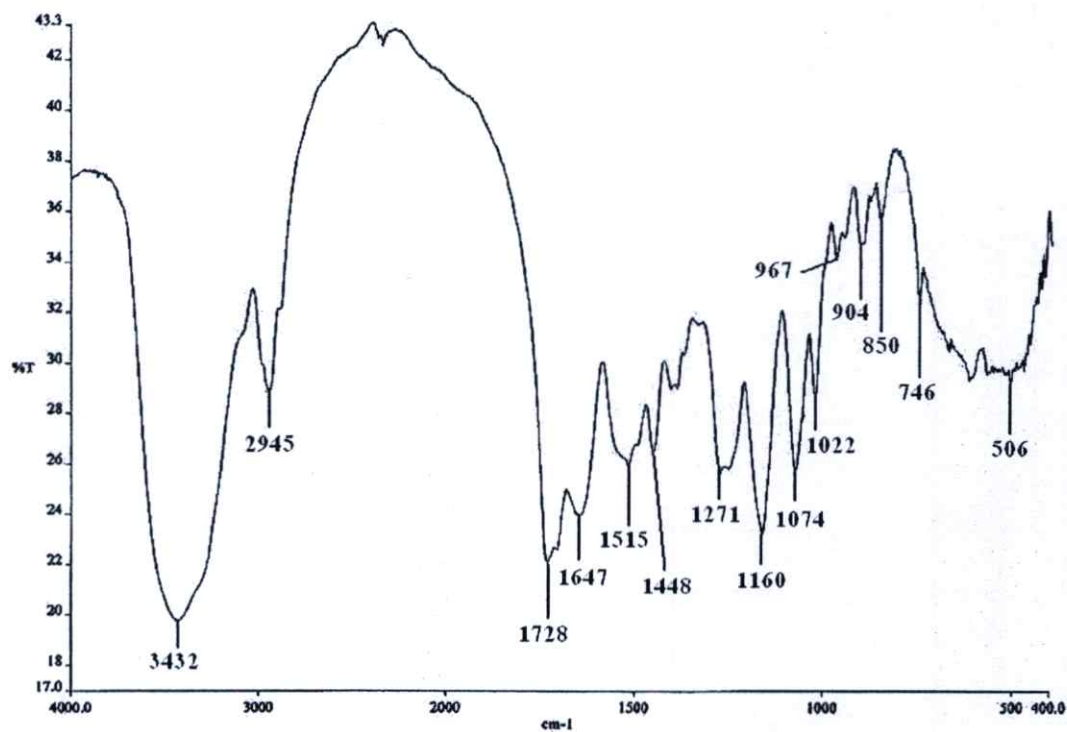
รูปที่ ก-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีเชื่อมกาบมะพร้าวแห้งโดยใช้มอร์แดนท์ในขณะเชื่อม



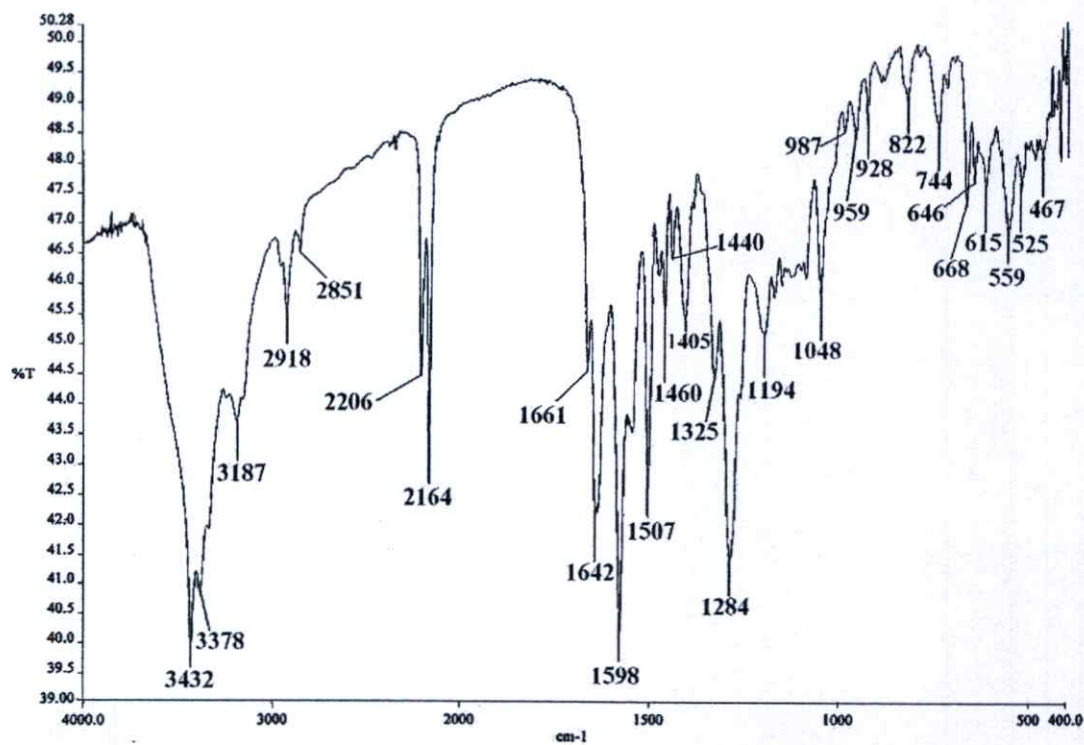
รูปที่ ก-7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกาวที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบเคย โดยใช้มอร์แดนทีในขณะย้อม



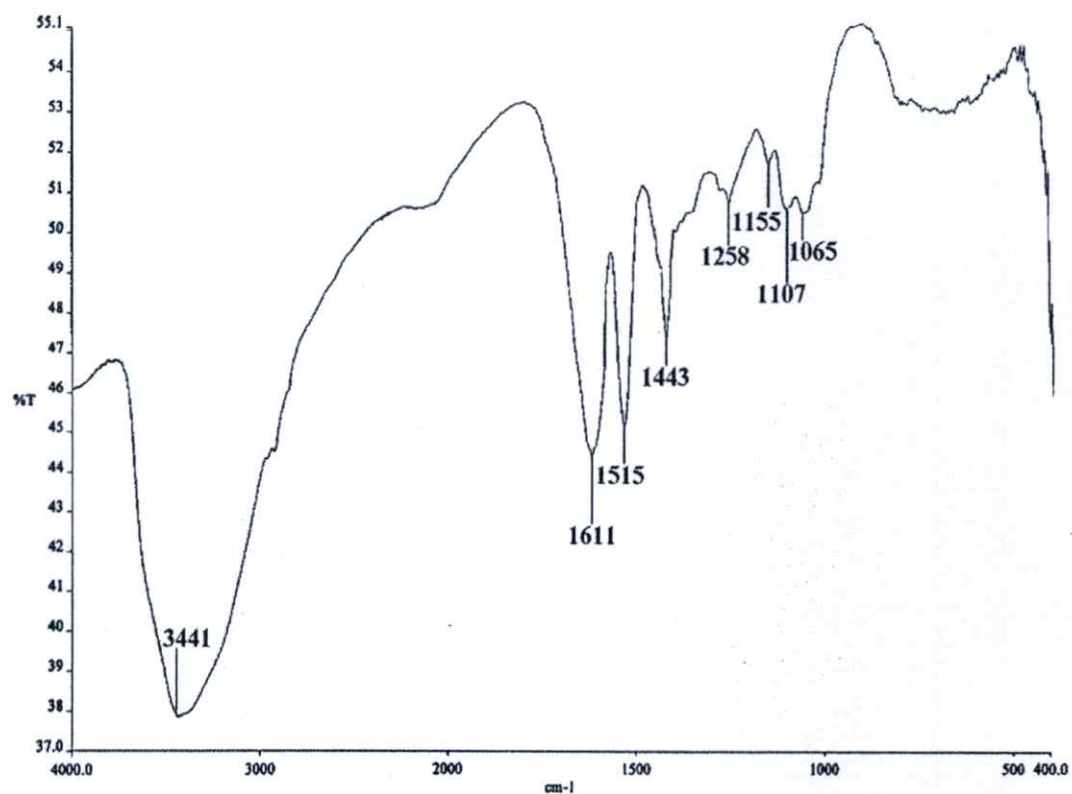
รูปที่ ก-8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกาวที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบซีเหล็กโดยใช้มอร์แดนทีในขณะย้อม



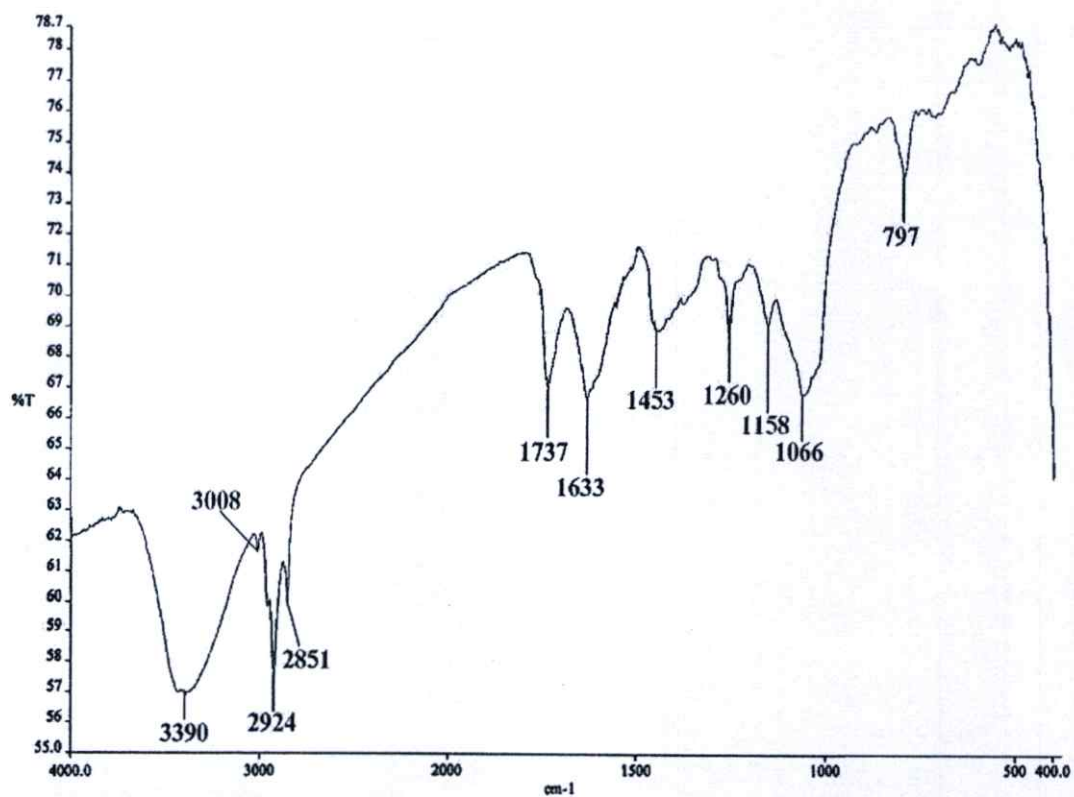
รูปที่ ก-9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมลอกกาวที่ต่อกิ่งด้วย HEMA ที่เชื่อมด้วยสีย้อมไบจีเหล็กโดยปราศจากการใช้มอร์แดนท์



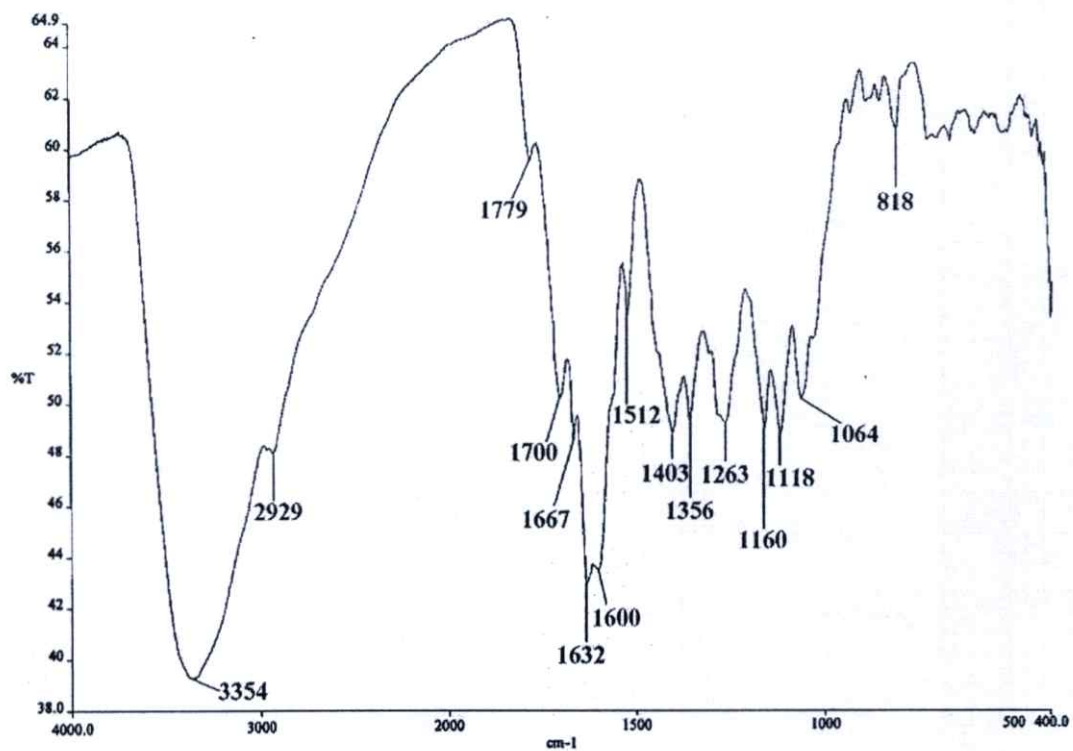
รูปที่ ก-10 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมแอซิด



รูปที่ ก-11 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมกามมะพร้าวแห้ง



รูปที่ ก-12 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อมไบเตย



รูปที่ ก-13 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีซ่อมไบซ์เหล็ก

ภาคผนวก ข.

การวัดค่าสี

ตารางที่ ข-1 การวัดสีของเส้นใยไหมลอกกาวและเส้นใยไหมที่ตอ่กึ่งด้วย HEMA ก่อนและหลังการย้อมด้วยสีย้อมแอซิด สีย้อมกามมะพร้าวแห้ง สีย้อมไบเตยและสีย้อมไบจีเหล็ก

ชนิดของสีย้อม	น้ำหนักเส้นใยที่เพิ่มขึ้นหลังตอ่กึ่ง	Color parameter				
		L*	a*	b*	C*	h°
(ก่อนการย้อม)	-	86.44 ± 0.01	-0.18 ± 0.02	4.11 ± 0.02	5.94 ± 0.02	85.60 ± 0.42
	25.4 ± 2.61	81.96 ± 0.03	0.20 ± 0.04	4.27 ± 0.01	6.32 ± 0.03	85.83 ± 0.56
	31.3 ± 1.45	80.63 ± 0.01	0.00 ± 0.01	5.84 ± 0.05	6.65 ± 0.02	84.99 ± 0.06
	51.4 ± 0.93	80.48 ± 0.03	0.33 ± 0.08	6.00 ± 0.06	7.04 ± 0.01	85.31 ± 0.07
สีย้อมแอซิด	-	29.98 ± 0.07	-0.13 ± 0.21	13.93 ± 0.18	14.58 ± 0.07	90.68 ± 0.37
	25.4 ± 2.61	21.36 ± 0.07	-0.24 ± 0.10	12.87 ± 0.05	13.39 ± 0.19	90.45 ± 0.16
	31.3 ± 1.45	20.69 ± 0.01	-0.26 ± 0.10	12.31 ± 0.13	11.65 ± 0.12	89.50 ± 0.34
	51.4 ± 0.93	16.38 ± 0.14	-0.52 ± 0.13	11.46 ± 0.06	11.84 ± 0.05	89.07 ± 0.68
สีย้อมกามมะพร้าวแห้ง	-	62.42 ± 0.02	6.27 ± 0.02	17.63 ± 0.05	19.69 ± 0.02	69.68 ± 0.02
	25.4 ± 2.61	61.60 ± 0.09	7.50 ± 0.04	18.12 ± 0.01	19.59 ± 0.03	68.65 ± 0.06
	31.3 ± 1.45	59.87 ± 0.01	7.36 ± 0.12	17.83 ± 0.09	21.68 ± 0.02	68.40 ± 0.04
	51.4 ± 0.93	56.66 ± 0.06	7.43 ± 0.07	18.25 ± 0.01	20.83 ± 0.14	68.46 ± 0.16
สีย้อมไบเตย	-	65.07 ± 0.01	-1.53 ± 0.02	23.49 ± 0.02	24.91 ± 0.01	93.52 ± 0.09
	25.4 ± 2.61	61.03 ± 0.03	-2.02 ± 0.02	23.27 ± 0.03	24.04 ± 0.04	93.79 ± 0.08
	31.3 ± 1.45	57.36 ± 0.06	-2.32 ± 0.03	23.45 ± 0.03	24.24 ± 0.04	95.20 ± 0.15
	51.4 ± 0.93	55.27 ± 0.05	-2.62 ± 0.05	23.41 ± 0.09	25.00 ± 0.06	95.10 ± 0.06
สีย้อมไบจีเหล็ก	-	61.29 ± 0.01	-0.05 ± 0.08	30.57 ± 0.01	29.09 ± 0.07	86.64 ± 2.00
	25.4 ± 2.61	55.90 ± 0.03	-0.12 ± 0.05	30.76 ± 0.62	29.21 ± 0.26	85.22 ± 0.17
	31.3 ± 1.45	55.17 ± 0.02	-0.19 ± 0.14	33.30 ± 0.25	29.71 ± 0.03	85.02 ± 0.02
	51.4 ± 0.93	54.94 ± 0.02	-0.76 ± 0.04	33.31 ± 0.33	30.86 ± 0.45	85.25 ± 0.09

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ชนิดของสีช้อม	น้ำหนักเส้นใย ที่เพิ่มขึ้น หลังต่อกิ่ง	Color parameter				
		L*	a*	b*	C*	h°
สีช้อมใบชี้เหล็ก	-	46.15 ± 0.94	-0.45 ± 0.54	20.04 ± 0.59	18.02 ± 0.74	88.85 ± 0.51
(ไม่ใช้มอร์แดนท์)	25.4 ± 2.61	46.80 ± 0.31	-0.71 ± 0.42	23.71 ± 0.74	21.64 ± 1.22	89.17 ± 0.15
	31.3 ± 1.45	45.58 ± 0.14	-0.98 ± 0.54	27.42 ± 0.37	22.86 ± 0.97	87.03 ± 0.53
	51.4 ± 0.93	44.35 ± 1.14	-1.57 ± 0.30	27.61 ± 0.58	20.83 ± 0.81	87.87 ± 0.40

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวเกวลิน ชันธุ์ชัยภูมิ
วัน เดือน ปีเกิด	31 ธันวาคม 2526
สถานที่เกิด	อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี
ที่อยู่	9/70 หมู่ 1 ต. สุรศักดิ์ อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี 20110
ประวัติการศึกษา	2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2549 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง