

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไหม (Silks) [1-5]

เส้นไหมได้ชื่อว่าเป็น “ราชินีแห่งเส้นใย” เนื่องจากไหมเป็นเส้นใยที่มีเอกลักษณ์ไม่เหมือนเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น มีความสวยงาม แลดูหรูหรา และมีคุณค่าด้วยการที่ไหมมีความเงามัน นุ่มนวล มีการทึงตัวที่ดี ดูดซึมความชื้นได้ดี แห้งง่าย ไม่เหนียวเหนอะหนะ ทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบาย มีพื้นผิวที่เรียบ ทำให้ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกเปื้อนติดได้ยาก มีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ จึงยังคงทำให้ไหมได้รับความนิยมตลอดกาล

เส้นไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้มาจากโปรตีนที่หนอนไหมขับออกมาเพื่อป้องกันตัวมันเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยจะมีความยาวต่อเนื่อง (Filaments) ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาวต่างจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น เช่น ฝ้าย ขนสัตว์ ลินิน ที่ล้วนเป็นเส้นใยสั้น เส้นไหมเป็นเส้นใยที่ได้จากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ แต่ไม่เหมือนกับเส้นใยขนสัตว์ คือ เส้นไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนน้อยมาก โดยทั่วไปสามารถจำแนกไหมออกเป็น 2 ประเภท คือ

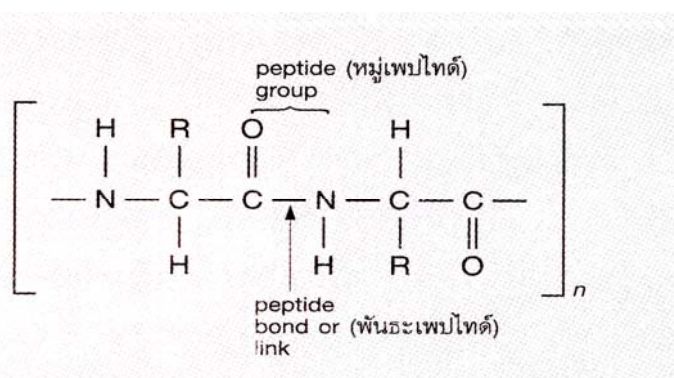
2.1.1 ไหมเลี้ยง (Mulberry Silk) หรือ ไหมบอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงกันภายใต้ภาวะการควบคุม โดยจัดหาอาหารให้ คือ ใบหม่อน (Mulberry Leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้จะมีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาวแล้วจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2.1.2 ไหมป่า (Wild Silk) เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นไหมทาสาร์ (Tussah Silk) จะมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีนและอินเดีย กินใบโอ๊คเป็นอาหาร หนอนพวกนี้เจริญเติบโตเอง สามารถเก็บรังดักแด้ได้จากต้นไม้ ไหมป่าให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล มีความหยาบ และไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าพันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ พันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) และสำหรับไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยงนิยมเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของไทย ซึ่งไหมไทยจะมีลักษณะเส้นใยที่มีสีเหลืองและค่อนข้างหยาบ มีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึง 38% มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ ที่ปกติมีกาวไหมเพียง 20 - 25% เท่านั้น ทำให้เส้นไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อทอผ้า

2.2 โครงสร้างของเส้นใยไหม (Structure of Silks) [1-3, 5-6]

ไหมเป็นโพลิโปรตีนธรรมชาติ เกิดจากการที่ตัวหนอนไหมโตเต็มวัยเริ่มเป็นดักแด้ฟั่นของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อมภายในตัวหนอน สารละลายนี้จะถูกอัดผ่านท่อสองท่อในหัวของตัวหนอนไหมไปสู่บริเวณที่เป็นรูเล็กๆ ส่วนที่เป็นของเหลวหนืดซึ่งเป็นไฟโบรอิน (Fibroin) จะถูกเคลือบด้วยโปรตีนอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นกาวไหม หรือที่เรียกว่า เซรีซิน (Sericin) ทำให้เส้นใย 2 เส้นติดกัน โปรตีนทั้งสองชนิดยึดติดกันโดยการสัมผัสกับอากาศทำให้แข็งตัวและเกิดเส้นใยยาวต่อเนื่อง ดังนั้นเส้นใยไหมจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ไฟโบรอิน ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเส้นใยมีประมาณ 75% โดยน้ำหนัก และกาวไหม (เซรีซิน) ทำหน้าที่เป็นตัวยึดติดเส้นใยไฟโบรอินสองเส้นเข้าไว้ด้วยกัน มีประมาณ 25% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในเส้นไหมมีไขมันและน้ำมันอยู่ประมาณ 0.5-1% และสารสีธรรมชาติ ประมาณ 1-1.4% ซึ่งโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยไหมเกิดจากปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ของกรดอะมิโนหลายชนิด



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโปรตีนที่เกิดจากการควบแน่นของกรดอะมิโน (R หมายถึง H หรือหมู่ข้างเคียง) [1]

ไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโน ประมาณ 15 ชนิด แต่กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไฟโบรอิน มี 4 ชนิด คือ ไกลซีน อะลานีน เซรีนและไทโรซีน ในส่วนของกาวไหมประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดเดียวกับไฟโบรอิน จะแตกต่างกันที่ปริมาณของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งกาวไหมจะมีกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงขนาดใหญ่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซรีน ธีโอ닌 กรดกลูตามิกและกรดแอสพาทิก คิดเป็นประมาณ 60% ของน้ำหนักกาวไหม

ตารางที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ที่พบในเส้นใยไหม [7]

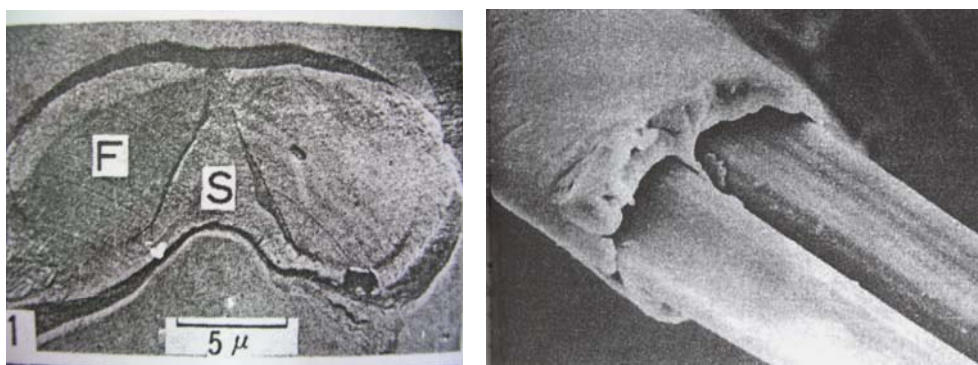
ชื่อ	โครงสร้าง	สัญลักษณ์	ลักษณะของหมู่ข้างเคียง
ไกลซีน (Glycine)	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Gly (G)	มีขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ
อะลานีน (Alanine)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \end{array}$	Ala (A)	ไม่มีขั้ว 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

กากไหมเป็นสารที่มีสีเหลืองแข็งและไม่ยืดหยุ่นตัว ป้องกันอันตรายให้กับเส้นใย (ไฟโบรอิน) และเป็นส่วนที่ปิดบังความมันเงาของไฟโบรอิน กากไหมถือว่าเป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) จึงไม่มีความเป็นผลึก เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเปปไทด์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าไฟโบรอิน จึงทำให้กากไหมละลายได้ในน้ำร้อนและยังสามารถละลายได้ในน้ำสบู่ร้อน สำหรับไฟโบรอินมีโครงสร้างที่ค่อนข้างเป็นระเบียบและมีการจัดเรียงตัวที่ดี มีความเป็นผลึกมาก ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างเคียงขนาดเล็ก

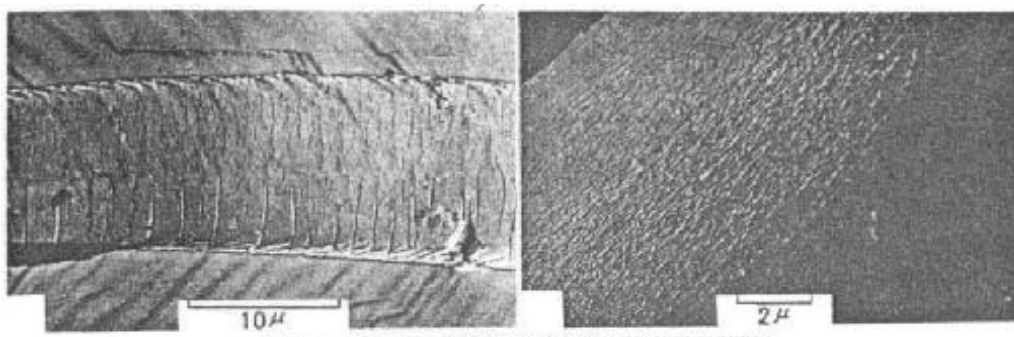
ในการศึกษาโครงสร้างของเส้นใยไหม จะศึกษาใน 2 ลักษณะคือ ศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ (ลักษณะภายนอก) และศึกษาโครงสร้างทางเคมี จะเน้นเกี่ยวกับไฟโบรอินซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเส้นใย

2.2.1 โครงสร้างทางกายภาพของไหม (Physical Structure of Silk) [1-3, 6]

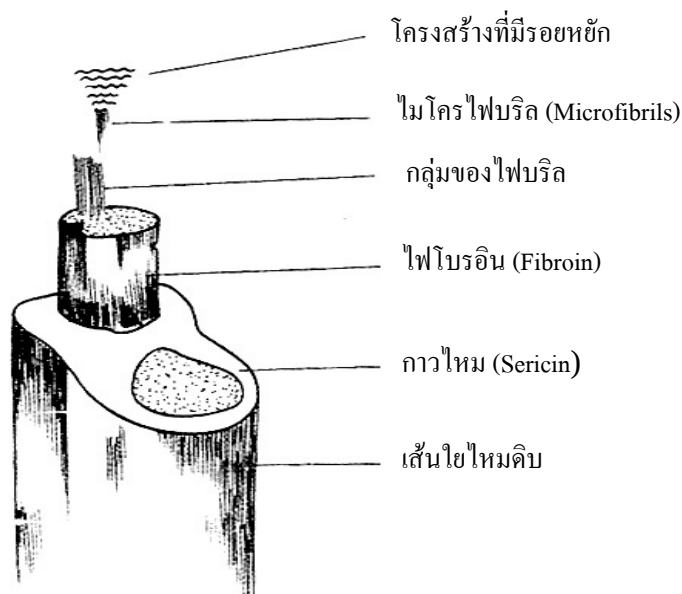
ไหมดิบเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้น มีผิวที่ราบเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใยเนื่องจากผิวของเส้นไหมชั้นนอกมีกาวเซรีซินซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นมากมายปกคลุมตามความยาวของเส้นใย ทำให้เส้นไหมมีความแข็งแรงกระด้าง ไม่เงามัน สีของเส้นใยไหมดิบจะมีสีเหลืองไปจนถึงสีครีม ที่ภาคตัดขวางของเส้นไหมจะเห็นเส้นใยต่อเนื่องที่เรียกว่า ไฟโบรอินอยู่ 2 เส้น มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน ล้อมรอบด้วยกาวไหม แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) และ(ข) หลังจากลอกเอากาวไหม (เซรีซิน) ออกแล้วจะได้เส้นใยไฟโบรอิน 2 เส้นที่ถูแยกออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยวมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบกว่าเส้นไหมดิบที่ยังไม่ผ่านการลอกกาว แสดงดังรูปที่ 2.3 (ก) และ(ข)



รูปที่ 2.2 (ก) ภาคตัดขวางของเส้นไหมจากรังไหม *Bombyx mori* F; ไฟโบรอิน (Fibroin), S; กาวเซรีซิน (Sericin) และ (ข) ไฟโบรอินที่ล้อมรอบด้วยกาวไหม [1, 6]



รูปที่ 2.3 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยจากรังไหมและไฟโบรอินของไหมเลี้ยง (*Bombyx mori*) (ก) ไหมดิบ และ (ข) ไฟโบรอินของผิวเส้นใยที่ลอกกาวแล้ว [6]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเส้นใยไหม [3]

นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยไฟโบรอิน เกิดจากการพันเกลียวเข้าด้วยกันของไฟบริลจำนวนมากและเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างตาข่าย ทำให้เห็นเป็นเหมือนท่อไปตามแนวยาวของเส้นใย หลังจากการลอกกาวแล้วจะได้เส้นใยขาวมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมปลายมนทั้งสองเส้นที่มีความมันเงาและ มีความละเอียดสูง

2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของไหม (Chemical Structure of Silk) [1-2, 6]

ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นโปรตีน ที่เรียกว่า ไฟโบรอิน ซึ่งเกิดจากการที่กรดอะมิโนหลายชนิดมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์หรือเปปไทด์ (Amide or Peptide bond) ด้วยการควบแน่นเกิดเป็นพอลิเอไมด์หรือพอลิเปปไทด์ โดยกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไฟโบรอิน ได้แก่ ไกลซีน อะลานีน เซรีนและไทโรซีน ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมและอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงดู แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในไฟโบรอิน [1]

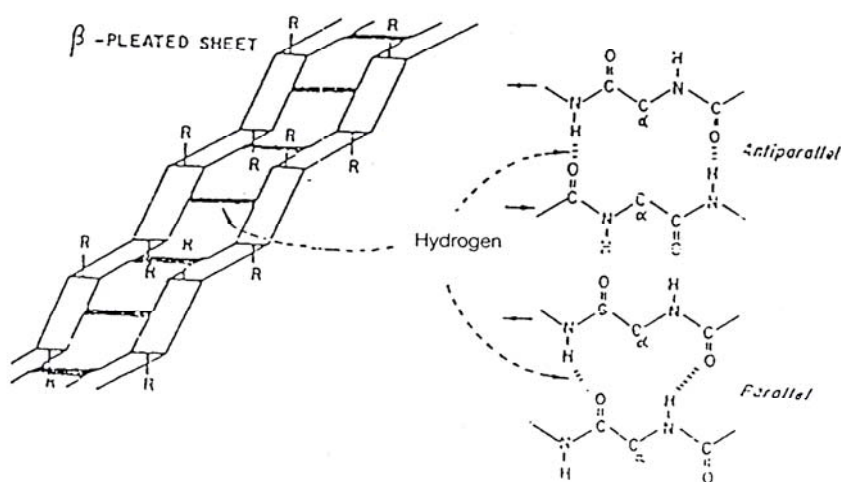
กรดอะมิโนที่สำคัญ	ปริมาณที่พบในไฟโบรอิน (เปอร์เซ็นต์)
ไกลซีน (Glycine)	43.99
อะลานีน (Alanine)	26.54
เซรีน (Serine)	11.41
ไทโรซีน (Tyrosine)	5.35

ธาตุที่สำคัญในไฟโบรอิน ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และไฮโดรเจน (H) สำหรับซัลเฟอร์ (S) จะมีปริมาณน้อยมากขึ้นกับโมเลกุลข้างเคียงจึงทำให้เส้นใยไหมแตกต่างจากเส้นใยขนสัตว์ซึ่งต่างก็เป็นเส้นใยโปรตีนเหมือนกัน แต่เส้นใยขนสัตว์เป็นโปรตีนชนิดเคราติน (Keratin) และมีปริมาณของซัลเฟอร์ 0.7-5% ปริมาณของธาตุต่างๆในไฟโบรอินแสดงดังตารางที่ 2.3

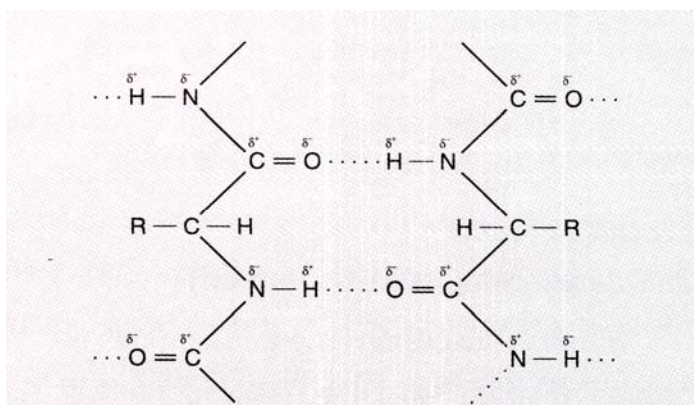
ตารางที่ 2.3 ธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนในไฟโบรอิน [1]

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

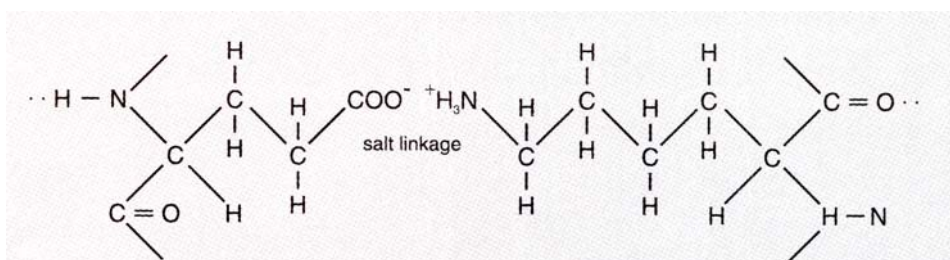
เนื่องจากโปรตีนของไฟโบรอินอยู่ในลักษณะที่มีการจัดเรียงตัวแบบแผ่นพับเบต้า (β -sheet) ซึ่งเกิดจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเปปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีลักษณะเหยียดยาวไม่พับตัวกันเหมือนขนสัตว์ โมเลกุลจึงเรียงตัวกันยาวและเกาะกันได้แน่นกว่า โดยยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโนเกิดโครงสร้างที่เป็นแผ่นพับของระนาบที่เกิดจากการขนานกันของสายพอลิเปปไทด์ มีการหักขึ้นลงเป็นแผ่นพับเหมือนรอยหยักขึ้นลงของการพับกระดาษกลายเป็นโครงสร้าง 3 มิติซ้อนกันหลายชั้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมีความเป็นผลึกมากจึงทำให้ไฟโบรอินไม่ละลายน้ำ ส่วนพันธะไดออกซิกพบได้เป็นส่วนน้อยในโครงสร้างของไหม



รูปที่ 2.5 โครงแบบแผ่นพับเบต้า (β -sheet) ของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไฟโบรอิน [8]

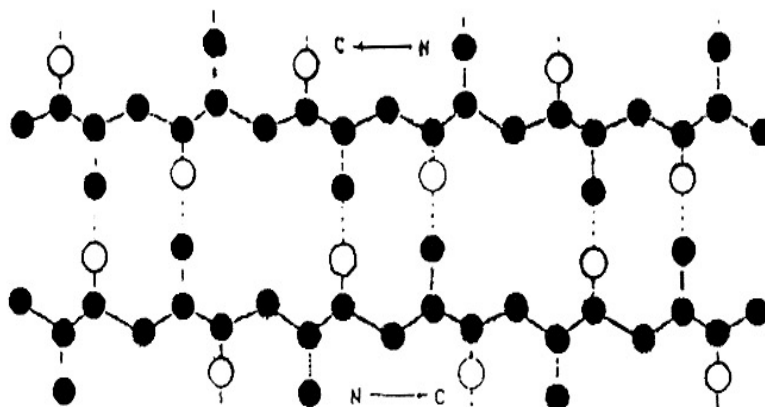


รูปที่ 2.6 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีโนของสายโซ่โพลีเปปไทด์ของเส้นไหม 2 โมเลกุล [1]

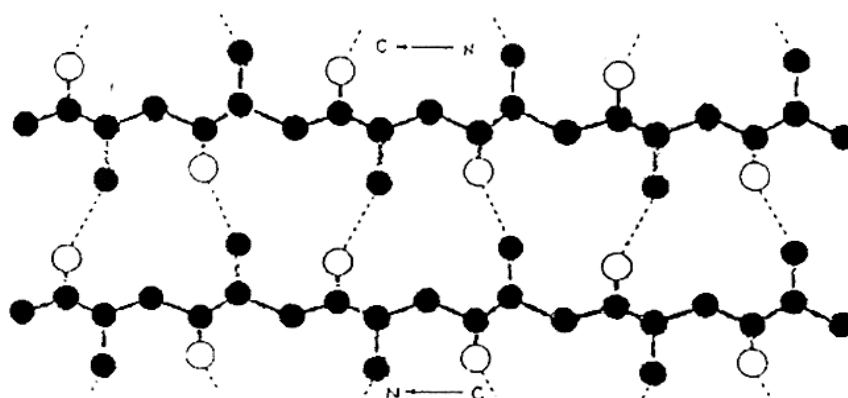


รูปที่ 2.7 การเกิดพันธะไอออนิกหรือ salt linkages ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีน ซึ่งเป็นหมู่ข้างเคียงของสายโซ่โพลีเปปไทด์ของเส้นไหม [1]

โมเลกุลไฟโบรอินนี้มีโครงสร้างแบบเบต้าที่สายเปปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไป C ตรงข้ามกัน เรียกว่า แอนติพาราเลล (Fully Extended Antiparallel) แสดงดังรูปที่ 2.8(ก) ในขณะที่โมเลกุลของเส้นใยโปรตีนชนิดอื่นจะมีโครงสร้างแบบพาราเลล (Parallel) คือสายเปปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไป C เหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 2.8(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) ลักษณะโครงสร้างแอนติพาราเลลเบตต้า-ชีท (Antiparallel pleated sheet structure)
และ (ข) พาราเลลเบตต้า-ชีท (Parallel pleated sheet structure)

จากการศึกษาไฟโบรอินด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X – ray diffraction) พบว่า กาวไหม (เซรีซิน) แสดงให้เห็นว่าเป็นบริเวณที่ไม่มีผลึกและโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ส่วนไฟโบรอิน แสดงส่วนที่เป็นผลึก มีการเรียงตัวดี ซึ่งบริเวณที่เป็นผลึกของโมเลกุลไฟโบรอินได้มาจากกรดอะมิโนที่มีโซ่ข้างเคียงเล็กๆ เช่น ไกลซีน อะลานีน และเซรีน บริเวณที่ไม่มีผลึกมาจากกรดอะมิโนที่มีโซ่ข้างเคียงที่ใหญ่ เช่น ไทโรซีน

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

2.3 สมบัติของไหม (Properties of Silk) [2, 4-5]

ไหมเป็นเส้นใยโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานเป็นอย่างมาก ทั้งในงานสิ่งทอและอุตสาหกรรมบางประเภท ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงสมบัติต่างๆของไหม เพื่อที่จะทราบถึงปัญหาต่างๆ และการนำไปใช้งานที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาสมบัติของเส้นใยออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังนี้

2.3.1 สมบัติทางกายภาพของไหม (Physical Properties of Silk) [2, 4-5]

1. **ลักษณะภายนอก** ไหมดิบจะเป็นลักษณะของเส้นใยคู่เกาะติดกันด้วยกาวไหมมีความมันนุ่มนวล ผิวนอกดูเรียบ แต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย หลังจากลอกเอากาวไหมออกแล้วจะเป็นเส้นใยเดี่ยว เรียบและพื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน เป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงขนาด 1.25 เดนิเยร์ต่อเส้น

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

3. **สี** ไหมมีสีตั้งแต่สีเหลืองถึงสีน้ำตาล โดยไหมบ้านมีสีตั้งแต่สีเหลืองจนถึงสีขาวในขณะที่ไหมป่ามีสีเหลืองเทา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ สภาพแวดล้อม และอาหารที่ใช้เลี้ยงดู

4. **ความมัน** ภายหลังจากที่ลอกกาวไหมออกแล้วไหมมีความมันดีมากให้ลักษณะความมันที่อ่อนนุ่ม สวยงาม

5. **ความแข็งแรง** ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงที่สุด ด้วยผิวที่เรียบมันทำให้ลดปัญหาจากการขัดถู ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของใยไหม กว้างประมาณ 9-11 ไมครอน ความละเอียดของเส้นใยทำให้ผ้าไหมสามารถที่จะได้รับการออกแบบให้มีโครงสร้างที่เบาบางและคงทน ค่าความเหนียวจะอยู่ในช่วง 2.4-5.1 กรัมต่อเดนิเยร์ และเมื่อเปียกน้ำจะมีความแข็งแรงลดลงเหลือเพียง 80-85% ของความเหนียวเมื่อเส้นใยแห้ง

6. สภาพยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่ยืดหยุ่นตัวได้ดีอาจแปรไปบ้างตามชนิดของพันธุ์และการเจริญเติบโต สามารถยืดได้ถึง 20% ของความยาวเดิม และจะยืดได้มากขึ้นถึง 33-35% เมื่อเปียก เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยขนสัตว์จะพบว่า สภาพยืดหยุ่นของไหมไม่ดีเท่าขนสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของไหมไม่มีพันธะมาจับเชื่อมเป็นโครงข่ายด้านข้าง ดังนั้นจึงไม่อาจดึงกลับคืนสภาพเดิมได้ทั้งหมด

7. การคืนตัวจากแรงอัด ไหมมีความสามารถในการคืนกลับได้ดีไม่เกิดการยับย่นง่ายสามารถกลับรูปเดิมได้เพียงแฉกหนึ่งไว้ระยะหนึ่ง แต่ไม่ดีและรวดเร็วเท่าใยขนสัตว์

8. การดูดซับความชื้น ที่สภาวะมาตรฐานความสามารถในการดูดซับความชื้นจะอยู่ที่ 11% ถือว่ามีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี ทำให้ไหมย้อมติดง่ายและทำการตกแต่งได้ดี ไหมต่างจากเส้นใยชนิดอื่นตรงที่สามารถดูดซึมเอาของเหลวที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น กลีของโลหะไว้ได้ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำลายเส้นใยทำให้เส้นใยแยกตัวและลดความทนทานลง เนื่องจากผ้าไหมเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีจึงรักษาความอบอุ่นได้นานเหมาะแก่การทำเป็นผ้าพันคอ ชุดสูท เป็นต้น

9. ความร้อน เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เส้นใยจะทนได้เป็นเวลานาน แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 175°C เส้นใยจะสลายตัวทันที นับได้ว่าค่อนข้างอ่อนไหวต่อความร้อนแต่ดีกว่าขนสัตว์เมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเลตนานๆ จะมีค่าความแข็งแรงและการยืดตัวลดลง

10. ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะของเส้นใยอยู่ระหว่าง 1.25-1.34 แต่ยังมีการทิ้งตัวดี ดังนั้นโครงสร้างเส้นใยจะไม่หนาแน่นเหมือนใยเซลลูโลส ทำผ้าเนื้อบางและเบาได้ดี เนื้อผ้าเหนียวและทนทาน

11. ความอยู่ตัว ผ้าไหมจะไม่ยืดและหดมากเมื่อซักแต่เมื่อรีดด้วยไอน้ำจะคืนกลับขนาดเดิมได้โดยง่าย

2.3.2 สมบัติทางเคมีของไหม (Chemical Properties of Silk) [2, 4-5]

1. ปฏิกริยาต่อกรด ไหมไม่ถูกทำลายด้วยกรดทั่วไปแต่กรดที่มีความเข้มข้นสูงสามารถทำลายไหมได้ โครงสร้างของไหมดูดซึมกรดได้เร็วและจะเกาะหรือจับติดอยู่แน่นแต่กรดอินทรีย์ไม่ทำลายไหมจึงถูกนำมาใช้ตกแต่งไหม

2. ปฏิกริยาต่อด่าง ไหมมีความทนต่อด่างได้ดีกว่าขนสัตว์ แต่อาจถูกทำลายได้ด้วยด่างที่มีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิสูงพอ ละลายได้ใน โซดาไฟร้อนแต่จะเกิดปฏิกิริยาและจะละลายช้ากว่าขนสัตว์ ด่างอ่อน เช่น สบู่ บอแรกซ์ และแอมโมเนียไม่เป็นอันตรายต่อไหมหากไม่ทิ้งไว้นาน

3. กลีอกลอรไรด์ ไหมถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของกลีอกลอรไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหงื่อ น้ำยาดับกลิ่น และน้ำเกลือทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งเหงื่อจะไปทำให้ผ้าไหมติดคราบ

4. สารละลายอินทรีย์ ผลึกภัณฑ์ไหมส่วนใหญ่มักใช้การซักแห้งอยู่เสมออาจเนื่องมาจากโครงสร้างของเส้นใยและสีที่ใช้ย้อม ซึ่งไหมสามารถซักด้วยน้ำยาซักแห้งได้

5. สารชักฟอก ไหมมีความทนต่อสารชักฟอกคล้ายขนสัตว์ ถูกทำลายได้ด้วยสารชักฟอกประเภทออกซิไดส์ เช่น พวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรด์ผสมอยู่ แต่สารชักฟอกประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโซเดียมเปอร์บอเรตภายใต้การชักปรกติจะไม่เกิดผลเสียต่อไหม

6. ราและแมลง ปรกติไหมไม่เกิดราได้ง่าย ยกเว้นถูกทิ้งไว้ในภาวะที่ค่อนข้างเปียกชื้นเป็นเวลานาน ไหมสะอาดจะไม่มีปัญหาของแมลงและรา ยกเว้นแต่ได้ผลจากสารตกแต่งสำเร็จหรือสิ่งสกปรกที่ติดมา

7. แสง ผ้าไหมไม่ทนต่อแสงแดดโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานาน ผ้าไหมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและความแข็งแรงลดลง

8. การย้อมสี ไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมได้ดีมาก อาจย้อมได้ด้วยสีที่เป็นแอสิค เบสิกหรือสีใดเรก ผ้าไหมเมื่อย้อมสีจะได้สีที่เข้มกว่าขนสัตว์และสามารถย้อมได้ในอุณหภูมิต่ำกว่าด้วย

2.4 การตกแต่งสำเร็จ (Finishes) [3-6]

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหรือกรรมวิธีต่างๆ ที่ทำขึ้นในระหว่างการผลิตผ้าหรือหลังจากการทอเป็นผืนผ้าและก่อนที่จะนำไปใช้ เพื่อเปลี่ยนผิวสัมผัส เนื้อ คุณสมบัติ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องบางประการของเส้นใย เส้นด้ายและผ้าให้มีสมบัติ ลักษณะ ผิวสัมผัส และประโยชน์ใช้สอยดีขึ้น

การตกแต่งสำเร็จอาจจำแนกออกได้หลายวิธี เช่น การตกแต่งด้วยวิธีเชิงกล การตกแต่งทางเคมี การตกแต่งชนิดถาวร การตกแต่งชั่วคราว การตกแต่งโดยทั่วไปและการตกแต่งพิเศษเพื่อประโยชน์ใช้สอย ซึ่งอาจจะสามารถแยกกระบวนการตกแต่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ (ตามกลไกการทำงานของการตกแต่ง) คือ

2.4.1 การตกแต่งเชิงกล [4]

เป็นการตกแต่งผ้าโดยใช้เครื่องจักรและเครื่องมือ เช่น แผ่นทองแดง ลูกกลิ้ง เครื่องดิ่ง ฯลฯ ช่วยเปลี่ยนรูปร่างหรือการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ภายในเส้นใย ผิวสัมผัสและคุณสมบัติของผ้าให้อยู่อย่างถาวรหรือชั่วคราวได้ เช่น การทำกันหด เป็นการตกแต่งเชิงกลให้ผ้าหดอย่างถาวร ส่วนการตกแต่งด้วยการรีดให้ผ้าเรียบเป็นมัน (Calendering) เมื่อซักคุณสมบัตินี้จะเสื่อมหายไปหรือการทุบ (Beetling) ให้ผ้าลินินมีเนื้อแน่น เป็นมัน เมื่อซักไปนานๆ เส้นด้ายจะกลับกลมและเนื้อผ้าหยาบเหมือนเดิม ซึ่งการตกแต่งดังกล่าวนี้เป็นการตกแต่งชั่วคราว

2.4.2 การตกแต่งทางเคมี [4]

เป็นการตกแต่งโดยใช้สารเคมีมาทำปฏิกิริยากับเส้นใย เช่น เรซิน ยาง สารประกอบที่ทำให้อ่อนตัว สารจับไอน้ำ สารต่อต้านรา สารต่อต้านแมลงและสารทนไฟ และเกิดการเปลี่ยนแปลงบางประการขึ้นภายในเส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ซึ่งใช้จนกระทั่งผ้าขาดการตกแต่งนั้นก็ยังคงอยู่ ส่วนการตกแต่งโดยเพิ่มสารเคมีบางอย่างเป็นการตกแต่งด้วยสารเคมีเหมือนกัน แต่สารเคมีที่นำมาใช้นั้นติดอยู่ภายนอก ไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในของเส้นใยมักนัก เช่น การลงแป้งให้แข็ง ซึ่งการตกแต่งแบบนี้เมื่อซักไปนานๆ สารเหล่านี้จะหลุดออก และผ้าจะคืนสภาพเดิม

2.4.3 กระบวนการก่อนการตกแต่งสำเร็จ [4]

ก่อนนำผ้ามาผ่านกระบวนการตกแต่งสำเร็จ จำเป็นจะต้องนำผ้านั้นมาผ่านกระบวนการบางอย่างซึ่งจำเป็นต้องทำอยู่เป็นประจำเพื่อให้ผ้าอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการตกแต่งสำเร็จ เช่น การเผาขน (Singeing) การเอาแป้งออก (Desizing) การทำความสะอาด (Scouring) และการชุบมัน (Mercerization) เป็นต้น

2.5 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหมโดยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment of Silks) [4, 6, 9]

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

ดังนั้นก่อนที่จะปรับปรุงเส้นไหมเพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ โดยการตกแต่งสำเร็จนั้นจึงต้องมีการทำความสะอาด (Scouring) เพื่อเอากาวไหม และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากเส้นใยซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมเส้นใยก่อนการตกแต่งสำเร็จในเส้นใยไหม การทำความสะอาดเพื่อลอกเอากาวไหมและสิ่งเจือปนออกนั้น เรียกว่า การลอกกาว (Degumming)

2.5.1 การลอกกาไหม (Silk degumming) [1, 6]

การลอกกาไหมเป็นกระบวนการแรกที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อกำจัดกาไหมและสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น จี๊ซ คาร์โบไฮเดรต สี และสารอนินทรีย์ ที่มีอยู่ในเส้นไหม ทำให้ไหมเกิดความเงามัน และนุ่มนวล มีการดูดซึมน้ำที่ดีขึ้น หลักการลอกกาไหม คือ การไฮโดรไลซ์กาไหมหรือทำลายพันธะเปปไทด์ของกาไหมให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโนและโพลิเมอร์ของกรดอะมิโน การลอกกาไหมทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กรด ค่าง เอนไซม์ และสบู่

2.5.1.1 การลอกกาไหมด้วยสบู่

การลอกกาไหมด้วยสบู่ต้องทำด้วยความระมัดระวังโดยดัดสารละลายสบู่และควบคุม pH ให้เป็นด่างน้อยๆ เท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นไหมถูกทำลาย วิธีนี้จะดัดสารละลายสบู่ที่อุณหภูมิ 90-95 °C เป็นเวลา 1.5-2 ชั่วโมง กาไหมจะลอกออกเกือบทั้งหมด การลอกกาไหมโดยใช้สบู่ให้เส้นไหมที่เงางามและเรียบสวยแต่ทำให้เกิดการลอกกาไหมที่ไม่สม่ำเสมอได้ง่ายและเกิดสีหมองคล้ำอันเกิดจากโคลสบู่ที่เกิดจากแคตไอออน (Cation) ในน้ำ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ซึ่งทำให้เกิดการข้อมสีด่างได้ง่าย การขจัดสบู่ด้วยการล้างทำได้ยากจึงทำให้เกิดสีเหลือง ดังนั้นน้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำอ่อนหรืออาจมีการเติมสารลดความกระด้าง (Sequestering agent) เพื่อลดความกระด้างของน้ำทั้งนี้เพื่อไม่ให้สบู่ตกค้างและเปื้อนติดอยู่ในไหม

2.5.1.2 การลอกกาไหมด้วยโซดา

นำไหมมาดัดด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 10-12% o.w.f. หรือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 12-15% o.w.f. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 °C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำอุ่นและน้ำธรรมดาหลายครั้ง มีวิธีการลอกกาไหม 2 ครั้งโดยแบ่งครึ่งสารละลายลอกกาไหมเพื่อป้องกันการลอกกาไหมที่ไม่สม่ำเสมอ วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องขจัดโคลสบู่และเวลาในการลอกกาไหมสั้นกว่าใช้ยาค่าต่ำกว่าแต่อัลคาไลมีความรุนแรงมากจึงทำให้การลอกกาไหมมากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายแก่เส้นใยและบางครั้งสูญเสียความโค้งงอ ความพองตัวและคุณภาพไหม

2.5.1.3 การลอกกาไหมด้วยสบู่-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 วิธีนี้ช่วยลอกกาไหมในเส้นไหมได้อย่างพอเพียงและให้ความขาวดีกว่าวิธีการลอกกาไหมด้วยโซดา สามารถใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตซึ่งมีปฏิกิริยาเป็นด่างอ่อนกว่า แทนการใช้โซเดียมคาร์บอเนต

2.5.1.4 การลอกกาวด้วยเอนไซม์

เป็นการนำเส้นไหมมาต้มในสารละลายเอนไซม์โปรตีเอสชนิดต่าง 0.1-0.3% pH 9.0-10.5 ที่อุณหภูมิ 40-65 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง กาวเซรีซินจะละลายออกมาแล้วล้างด้วยน้ำอุ่นและน้ำธรรมดาหลายๆ ครั้ง วิธีนี้สามารถลอกกาวเซรีซินได้อย่างสม่ำเสมอแต่มีข้อเสียคือเอนไซม์โปรตีเอสมีราคาแพง

2.5.1.5 การลอกกาวด้วยกรด

ในการลอกกาวไหมด้วยสารละลายกรดที่ pH น้อยกว่า 2.5 หรือระหว่าง 1.5-2 กาวไหมจะถูกกำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ กรดแร่ (Mineral acids) ได้แก่ กรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลอกกาวไหมมากกว่ากรดอินทรีย์ (Organic acids) แต่ไม่เป็นที่นิยม เพราะมักจะเกิดปัญหาและยังมีปัญหาด้านคุณภาพของไหมลอกกาว

2.5.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical finishing) [6, 9-11]

เส้นไหมที่ผ่านการลอกกาวแล้วจะมีความสวยงาม มั่นคง และนุ่มนวลมากขึ้น แต่เมื่อกำจัดกาวไหมออกแล้วทำให้น้ำหนักผ้าลดลงมาก สมบัติของเส้นใยที่ได้มีค่าลดลง ประกอบกับเส้นไหมมีข้อด้อยต่างๆ เช่น เมื่อโดนกับแสงแดดเป็นเวลานานๆ เส้นใยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและความแข็งแรงลดลง มีความสามารถในการคืนตัวจากรอยยับที่ไม่ดีตลอดจนมีความไวต่อความร้อนและสารเคมี สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการใช้วิธีการทางเคมีโดยการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งการตกแต่งทางเคมีของไหมมีหลายอย่าง เช่น การเพิ่มน้ำหนักของไหมด้วยเกลือของโลหะ (Metallic Salt) เช่น ดิบบุกคลอไรด์ ทำให้อายุการใช้งานยาวขึ้น มีน้ำหนักและมีการทิ้งตัวที่ดีขึ้น การตกแต่งด้วยเรซินเพื่อให้เกิดความคงทนต่อการยับ ทนต่อการหดตัว ให้ความนุ่ม มีความคงทนต่อแสงแดดและคงทนต่อการขัดสี สารเคมีที่นำมาใช้ในการตกแต่งไหมมีหลายชนิดที่สำคัญได้แก่ สารประกอบพวกที่เป็นโมโนเมอร์และพอลิเมอร์ เช่น ยูเรีย และเมลามีน พอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต เช่น อีพอกซี ซิลิโคน ฟีนอลิก อะคริลามิด คาร์บอนเนตและพอลิยูรีเทน ซึ่งให้โครงสร้างเป็นร่างแห และพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิไวนิลเรซิน พอลิอะคริลเรซิน พอลิอะมิดเรซิน และพอลิโอฟีนส์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง และเมื่อเร็วๆ นี้มีวิธีการทำให้เกิดพอลิเมอร์แบบตอกกิ่ง (Graft polymerization) โดยใช้สารประกอบไวนิล อะคริลิก สไตรีน ซึ่งไวนิลมอนอเมอร์ที่นิยมใช้มีมากมายหลายชนิด ได้แก่ เมทิลเมทาคริเลต เมทาคริลลาไมด์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต อีพอกซีเรซิน และไซเลน เป็นต้น โดยจะทำให้ได้เส้นใยไหมที่มีสมบัติแตกต่างกันไป

การตกแต่งสำเร็จใหม่ด้วยวิธีการต่อกิ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ 2 กลไก คือ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) และการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft copolymerization) [11]

2.5.2.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ [11-14]

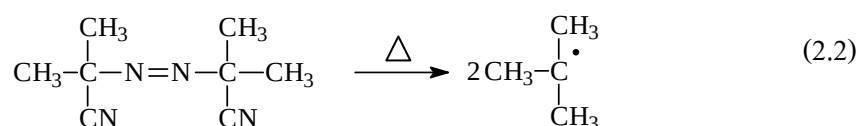
กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระนี้ จะเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเริ่มจากการใช้ตัวเริ่มต้นที่สามารถแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะไพ (π-bond) บนไว้นิลมอนอเมอร์และเกิดการสลายตัวไปเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ที่สามารถเข้ารวมกับมอนอเมอร์ตัวอื่นจนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวออกมา ตัวเริ่มต้นที่นำมาใช้ต้องเป็นสารเคมีที่เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะต่างๆ ได้แก่ ความร้อน รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า และการกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมีสามารถให้อนุมูลอิสระที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอนุมูลอิสระซึ่งเกิดจากมอนอเมอร์และอนุมูลอิสระดังกล่าวต้องมีความว่องไวเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยากับไว้นิลมอนอเมอร์เพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ขึ้นมา ซึ่งวิธีที่สำคัญที่ใช้ในการเตรียมอนุมูลอิสระมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

(ก) การสลายตัวด้วยความร้อน [13]

สารเคมีบางชนิดสลายตัวให้อนุมูลอิสระเมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดทั้งในเชิงการค้าและในการศึกษากลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชิงทฤษฎี โดยตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาที่สำคัญมักมีโครงสร้างเป็นสารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ เอโซ เปอร์ซัลเฟต สารริเริ่มส่วนใหญ่จะมีพลังงานพันธะอยู่ในช่วง 25-40 กิโลแคลอรี/โมล เพราะสารที่มีพลังงานพันธะสูงกว่านี้จะสลายตัวช้าเกินไป ถ้าต่ำกว่านี้ก็สลายตัวเร็วเกินไป จึงไม่เหมาะที่จะเป็นสารริเริ่ม ดังนั้นประเภทสารที่เหมาะสมจึงจำกัดเหลือเพียงสารที่มีพันธะ O-O, S-S และ N-O ในโมเลกุลของสารเท่านั้น สารที่นิยมใช้เป็นตัวเริ่มต้นมากที่สุด ได้แก่ สารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่มีพันธะ O-O แสดงการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระดังสมการที่ 2.1



นอกจากนี้ยังมีสารอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้เป็นตัวเริ่มต้น คือ สารประเภทเอโซ และที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ 2,2-azobisisobutyronitrile ซึ่งเรียกย่อว่า AIBN โครงสร้างและการสลายตัวของสารนี้แสดงดังสมการที่ 2.2



(ข) การกำเนิดอนุมูลอิสระด้วยแสง [13]

การกำเนิดอนุมูลอิสระด้วยแสงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวิธีโฟโตเคมีคัลโดยเริ่มจากการที่มอนอเมอร์หรือสารริเริ่มถูกกระตุ้นโดยการรับพลังงานโฟตอนจากการฉายแสงอัลตราไวโอเลต ทำให้เคลื่อนตัวจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า (excited state)



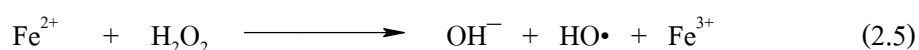
แล้วมอนอเมอร์ในสถานะเร้าจะแตกสลายตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ 2.4



หลังจากนั้นอนุมูลอิสระที่ได้จะเริ่มเข้าร่วมตัวกับมอนอเมอร์เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน

(ค) การเกิดอนุมูลอิสระโดยใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ [13]

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันหรือปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นจำนวนมากใช้อนุมูลอิสระที่สามารถริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ วิธีที่ใช้กันมากและใช้กันมาช้านาน ได้แก่ น้ำยาเฟนตัน (Fenton's reagent) ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกซิล (II) อีออน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารทั้งสองทำปฏิกิริยากันเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ดังสมการที่ 2.5



(ง) การเกิดอนุมูลอิสระด้วยรังสี [14]

รังสี α β γ และรังสีเอกซ์ เป็นรังสีที่มีพลังงานสูง นิยมนำมาใช้ริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ โดยรังสีเหล่านี้จะเหนี่ยวนำให้มอนอเมอร์เกิดการสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างยุ่งยากเพราะนอกจากจะมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้นแล้วยังมีไฮดรอกซิลและไฮดรอกซิลที่เกิดจากการสลายตัวของมอนอเมอร์เกิดขึ้นอีกด้วย

พอลิเมอร์ร่วมแบบตอ้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งที่มีโมเลกุลของโครงสร้างหลักและสายโซ่กิ่งเป็นโมเลกุลต่างชนิดกัน ซึ่งเกิดจากการมีจุดว่องไวเกิดที่ในสายโซ่หลักไม่ใช่อยูที่ปลายสายโซ่ แล้วเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไป วิธีที่ใช้กันมากคือ ใช้แสงอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการดึงอะตอมไฮโดรเจนออกจากสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดแรดิคอลในสายโซ่พอลิเมอร์ แล้วเติมมอนอเมอร์ชนิดที่สองลงไป อีกวิธีหนึ่งอาจเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างตัวเริ่มต้นกับ สายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายของพอลิเมอร์ชนิดที่สอง ปฏิกิริยาจะเกิดจุดว่องไวโดยการหลุดออกของอะตอมไฮโดรเจนแล้วมอนอเมอร์ชนิดที่สองจะเข้าร่วมตัวที่จุดว่องไวต่อไป การเกิดการตอที่กิ่งสาขานี้ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ร่วมที่ได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น พวกเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งไม่ค่อยรวมตัวกับสีย้อมแต่การตอกิ่งด้วยพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเข้าไปที่กิ่งสาขาช่วยให้เส้นใยสังเคราะห์สีย้อมได้ง่ายขึ้น เป็นต้น ซึ่งกลไกการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ้งอาจเป็นแบบอนุมูลอิสระหรือแคตไอออนิกแต่ส่วนใหญ่จะเป็นกลไกแบบอนุมูลอิสระ

ดังนั้นการตอกิ่งบนเส้นใยไหมจึงเป็นการเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบหนึ่งเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของเส้นไหมหลังจากการลอกกาวแล้วให้ดีขึ้นโดยการนำเส้นไหมมาตอกิ่งด้วยมอนอเมอร์ ซึ่งมอนอเมอร์ที่นิยมใช้มีหลายชนิดแต่ละชนิดก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ มอนอเมอร์ที่มักนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของไหม ได้แก่ อีพอกซีเรซิน ไคเบสิกแอนไฮไดรด์ และพวกไวนิลมอนอเมอร์ ได้แก่ Styrene MMA MAA HEMA โดยสาร 2 กลุ่มแรกมักจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ข้างเคียงที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของกรดอะมิโนที่อยู่บนโครงสร้างหลักของไฟโบรอินในขณะที่สารกลุ่มหลังจะแทรกซึมเข้าไปยังเมตริกซ์ของเส้นใยแล้วจึงเกิดพอลิเมอร์ร่วมโดยมอนอเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการตอกิ่งจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบตอ้งตรงตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยไฟโบรอิน ได้แก่ หมู่คาร์บอนิล เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิลต่างๆ ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ของกรดอะมิโนโดยสมบัติที่ได้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการปรับปรุง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในส่วนนี้จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างโปรตีนทำให้เส้นใยที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น

2.6 การย้อมสี (Dyeing) [3-5, 16-17]

สีของผ้าเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งและเป็นเครื่องตัดสินคุณภาพของผ้าชิ้นนั้นได้ สีเกือบจะเป็นสิ่งแรกที่ผู้ซื้อสังเกตก่อนการพิจารณาถึงคุณภาพอย่างอื่นของผ้าเมื่อต้องการซื้อ ดังนั้นการย้อมสี จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีที่สวยงาม สะดุดตา ดึงดูดความสนใจของผู้พบเห็น

การย้อมติดสีของเส้นใยเกิดจากการที่โมเลกุลของสีและเส้นใยรวมเข้าเป็นสารประกอบใหม่ ชนิดหนึ่งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไปและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสมบัติทางกายภาพ คือ ทำให้เส้นใยมีสีต่างๆ ขึ้นมา โมเลกุลของสีย้อมมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่สามารถซึมเข้าไประหว่างโมเลกุลของเส้นใยได้เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดเล็กกว่าช่องว่าง (Pore) ระหว่างโมเลกุลของเส้นใยจึงเกิดการย้อมติดสีขึ้น การย้อมสีส่วนใหญ่ใช้น้ำเป็นตัวกลางและเส้นด้ายหรือผ้าเมื่อนำไปแช่น้ำจะพองตัวในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำซึ่งมีอยู่ในเส้นใยนั้น การพองตัวของเส้นใยนี้จะเกิดแต่เฉพาะบริเวณของส่วนหลวมหรือช่องว่างของเส้นใยเท่านั้นซึ่งจะทำให้ช่องว่างนี้มีขนาดใหญ่ขึ้น เส้นใยทุกชนิดมีขนาดช่องว่างไม่เท่ากันขนาดโมเลกุลของสีย้อมก็มีขนาดไม่เท่ากันด้วยจึงเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้สีบางตัวย้อมเส้นใยบางชนิดไม่ติดหรือติดได้

เมื่อโมเลกุลของสีซึมผ่านช่องว่างเข้าไปภายในเส้นใยแล้วสีย้อมที่อยู่ในน้ำย้อมจะซึมเข้าไปในเส้นใย ดังนั้นเส้นใยจะค่อยๆ มีโมเลกุลของสีรวมมากขึ้นทุกทีสีก็จะมีความเข้มมากขึ้นไปตามลำดับปริมาณของสีย้อมที่จะย้อมติดเส้นใยได้มากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Reactive group) ของสีย้อมและเส้นใยนั้นๆ

กลไกที่เกี่ยวข้องกับการย้อมสีที่สำคัญมีอยู่ 3 กลไกด้วยกัน ได้แก่ [3, 16-17]

1. การดูดซับของสีย้อมที่ผิวของเส้นใย (Sorption) เมื่อนำเส้นใยหรือวัสดุสิ่งทอจุ่มลงในน้ำโมเลกุลของสีที่กระจายตัวอยู่ในน้ำจะเคลื่อนมาเกาะที่ผิวของเส้นใยหรือผิวของวัสดุที่ใช้ย้อมซึ่งจะทำให้เกิดการย้อมติดสีขึ้น

2. การดูดซึมของสีย้อมเข้าสู่เส้นใย (Diffusion) เมื่อโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่มาเกาะอยู่รอบผิวของเส้นใยแล้วโมเลกุลจะแทรกซึมเข้าสู่เส้นใย การเพิ่มอุณหภูมิในขณะย้อมจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยทำให้โมเลกุลของสีย้อมแทรกตัวเข้าสู่เส้นใยหรือวัสดุสิ่งทอได้เร็วขึ้นโดยสีย้อมจะเคลื่อนตัวเข้าสู่เส้นใยจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งเป็นจุดที่เส้นใยและสีย้อมมีสัมพันธภาพทางเคมีเท่ากัน

3. การคงทนของสีบนเส้นใย (Retention) โมเลกุลของสีย้อมที่เคลื่อนตัวเข้าสู่เส้นใยจะเกิดการคงทนของสีบนเส้นใยได้โดยอาศัยกลไกทางเคมีและกายภาพเนื่องจากสีย้อมธรรมชาติเป็นสีที่ละลายน้ำได้ เมื่อนำเส้นใยที่ย้อมด้วยสีเหล่านี้ไปทำความสะอาด โมเลกุลของสีที่ยึดติดกับเส้นใยจะเคลื่อนตัวออกแล้วทำให้เกิดการตกของสีขึ้นซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้มอร์แดนต์ (Mordant) ซึ่งโมเลกุลของมอร์แดนต์จะรวมตัวกับโมเลกุลของสีย้อมธรรมชาติแล้วทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้นทำให้เส้นใยที่ย้อมด้วยสีเหล่านี้มีความคงทนต่อการซักเพิ่มขึ้น

การที่จะย้อมสีให้ได้ผลดีนั้น แรงยึดเหนี่ยวของสีย้อมกับเส้นใยต้องมีความแข็งแรงยิ่งยวดของสีย้อมกับน้ำ โมเลกุลของสีย้อมจะต้องมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการยึดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น ในการย้อมติดสีจะต้องมีแรงอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจมีมากถึง 4 ชนิด ที่จะทำให้เกิดการรวมกันของสีย้อมและเส้นใยได้

แรงที่ทำให้สีย้อมเกิดการยึดติดกับเส้นใยได้ มี 4 ชนิด ได้แก่ [17]

1. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy group) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่นได้ ได้แก่ พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ

2. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' forces) แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแรงอย่างอ่อนๆ ที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดติดกันได้เองระหว่างตัวสีย้อมกับเส้นใย ตัวอย่างเช่น แรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสกับสีย้อมเวทีหรือสีไครเรท

3. แรงไอออนิก (Ionic forces) การยึดรวมตัวระหว่างเส้นใยและสีย้อมนี้ เกิดขึ้นได้โดยความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อเส้นใยอยู่ในน้ำจะแสดงความเป็นลบและส่วนใหญ่สีย้อมซึ่งละลายในน้ำเป็นแอนไอออน การดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนโดยการเติมเกลือลงในน้ำย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสและเติมกรดลงในน้ำย้อมสำหรับเส้นใยโปรตีนและไนลอนจะเป็นการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีอยู่ในเส้นใยได้แต่สีย้อมบางประเภทซึ่งเป็นแคทไอออนอยู่แล้ว เช่น สีที่ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก สีย้อมประเภทนี้จึงสามารถเกิดแรงไอออนิกกับเส้นใยได้ง่าย

4. พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ในกรณีของสีรีแอคทีฟสามารถยึดกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่กล่าวมาข้างต้น

2.6.1 สารให้สีแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ พงสี (Pigment) และ สีย้อม (Dye) [3-5, 18]

2.6.1.1 พงสี (Pigment) เป็นสารที่ละลายน้ำไม่ได้และเป็นสีที่มีขนาดเล็กมักติดอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยโดยการใส่เรซินลงไป พงสีจึงจะรวมตัวได้กับเส้นใย ดังนั้น พงสีทุกชนิดสามารถใช้ได้กับเส้นใยทุกชนิด พงสีมีอยู่จำนวนมากมายทำให้สีแตกต่างกัน การใช้พงสีในการย้อมผ้า เรียกว่า การย้อมด้วยพงสี (Pigment dyeing) การย้อมด้วยพงสีมีขั้นตอนง่ายๆ เกี่ยวข้องกับการจุ่มอัดเรซิน (Padding) การทำให้แห้ง (Drying) และการทำให้ยึดติด (Fixing) ส่วนใหญ่ มักเติมพงสีลงไปในสารละลายที่จะนำมาปั่นในระหว่างกระบวนการผลิตเส้นใย นอกจากนี้ยังมีการใช้พงสีกันอย่างกว้างขวางในการพิมพ์มากกว่าการย้อม

2.6.1.2. สีย้อม (Dye) คือ สารอินทรีย์ที่สามารถดูดซึมและสะท้อนความยาวคลื่นของแสงภายในช่วงที่มองเห็นได้ โมเลกุลของสีย้อมต้องมีระบบคอนจูเกต (Conjugated system) คือ สามารถเปลี่ยนพันธะโคเวเลนต์คู่และเดี่ยวได้ภายในอะตอมที่เป็นโครงสร้างของสีย้อม โครงสร้างนี้จะมีหมู่พิเศษที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophores) และออกโซโครม (Auxochromes) โครโมฟอร์เป็นตัวให้สี ถ้าปราศจากโครโมฟอร์เราจะไม่เห็นสี และออกโซโครมเป็นตัวทำให้สีเข้มยิ่งขึ้น ซึ่งสีที่เราเห็นนั้นเป็นสีจากความยาวคลื่นทั้งหมดที่ไม่ได้ถูกดูดกลืน ปกติสีย้อมจะกระจายไปในโครงสร้างภายในของเส้นใยจากสารละลายและติดอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานภายในเส้นใย ออกโซโครมช่วยทำให้รับสีย้อมได้เพิ่มขึ้นเพราะช่วยทำให้สีย้อมละลายน้ำได้ดีมากยิ่งขึ้นและทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยจึงช่วยในเรื่องของสิ่งทอที่ย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จ โดยส่วนใหญ่สีย้อมจะคงอยู่ในเส้นใยโดยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิกหรือการยึดจับทางกล มีสีย้อมเพียงไม่กี่ชนิดที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยพอลิเมอร์โดยเกิดพันธะโคเวเลนต์กับสีย้อม สีย้อมมักมีโมเลกุลขนาดใหญ่ สีย้อมที่มีขนาดเล็กกว่าจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยได้รวดเร็ว แต่สีย้อมที่มีขนาดใหญ่กว่าจะคงอยู่ในเส้นใยได้นานกว่า

สีย้อมสามารถจำแนกตามแหล่งที่มาได้ 2 ประเภท คือ สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyes) และ สีย้อมธรรมชาติ (Natural Dyes) [3-5, 18-20]

1. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyes) เป็นสีย้อมที่สังเคราะห์ได้จากสารอินทรีย์เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในห้องปฏิบัติการ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะหนัก มีหลากหลายสี คงทนต่อการซักล้าง ทนแดดทนร้อน ย้อมติดเส้นใยทุกชนิด ผลิตได้ทีละมากๆ ใช้ง่าย เก็บรักษาง่าย ราคาถูก ทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก สีย้อมสังเคราะห์ที่จำแนกตามการใช้งาน เช่น สีแอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีรีแอกทีฟ เป็นต้น

2. สีย้อมธรรมชาติ (Natural Dyes) เป็นสีย้อมที่ได้มาตามธรรมชาติจากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ เช่น ครั่งตัวเมียจะมีสีม่วงแดงเหมาะสำหรับย้อมไหมและขนสัตว์ได้สีสวยและไม่ตกสีเวลาใช้ย้อมไหมจะทำให้ผ้ามีเนื้อมากขึ้น สีดำจากผลมะเกลือ รากของต้นเข็มให้สีแดงเป็นสีที่ทนแดดและทนซัก ซึ่งความคงทนของสีย้อมจะแตกต่างกันไปในหมู่สีย้อมธรรมชาติแต่ปัญหาใหญ่ของสีย้อมธรรมชาติ คือ ความไม่ทนต่อแสงและอากาศ สีจึงซีดเร็วอีกทั้งยังหาได้ค่อนข้างยากจึงไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ [20]

สีย้อมธรรมชาติ	แหล่งที่มาจากธรรมชาติ
สีดำ	ผลมะเกลือ รากชะพลู ใบสมอ เปลือกสมอ
สีเหลือง	หัวขมิ้น แก่นขมิ้น
สีเทา	ใบสัก ขมิ้นชัน
สีแดง	ก้านดอกกรรณิการ์
สีม่วง	รากขมิ้น ใบผงคำฝอย ครั่ง (สัตว์)

ตารางที่ 2.6 ข้อเปรียบเทียบระหว่างสีย้อมธรรมชาติ และสีย้อมสังเคราะห์ [20]

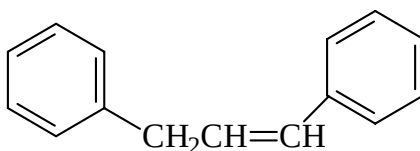
สีย้อมธรรมชาติ	สีย้อมสังเคราะห์
1. ความสดใส	1. ความสดใส
2. ติดง่าย ซีดจางไว	2. ติดทน ทนทาน
3. มีจำนวนสีให้เลือกน้อย	3. มีจำนวนสีให้เลือกมากกว่า
4. ขบวนการย้อมยุ่งยาก	4. ขบวนการย้อมง่าย

แต่สีย้อมสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะหนัก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้เกิดผลกระทบทั้งในคนและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความนิยมการใช้สีย้อมจากธรรมชาติกลับมาอีกครั้ง และมีการค้นคว้าแหล่งสีจากพืชหลากหลายชนิดให้สีได้หลากหลายสีไม่แพ้สีย้อมสังเคราะห์

ปัจจุบันได้มีการตื่นตัวให้ความสนใจในการนำสีย้อมจากธรรมชาติเข้ามาใช้ในงานด้านสิ่งทอมากขึ้น เนื่องจากสีธรรมชาติเป็นสีที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ที่ทำการย้อม นอกจากนี้สีธรรมชาติยังทำให้วัสดุที่นำมาย้อมมีสีที่อ่อนและเย็นตากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ย้อมด้วยสีย้อมสังเคราะห์แต่สีย้อมที่ได้จากธรรมชาติมีข้อด้อย คือ ขั้นตอนในการเตรียมนำย้อมยุ่งยาก วิธีการย้อมขึ้นกับผู้ชำนาญและเทคนิคของแต่ละบุคคลไม่มีสูตร

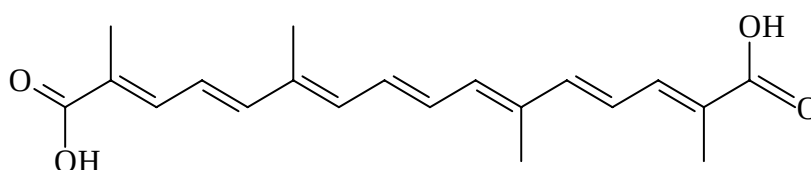
ในการย้อมแน่นอนและสีที่ใช้ในการย้อมแต่ละครั้งไม่เหมือนเดิม ปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าว เช่น การปรับปรุงในส่วนที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนในการย้อม การนำมอร์แดนต์ (Mordant) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ช่วยให้สีย้อมติดเส้นใยและสารเคมีอื่นๆ มาช่วยในการย้อม การทดลองนำพืชชนิดต่างๆ มาใช้ย้อมเพื่อให้ได้สีที่หลากหลายมากขึ้น สีย้อมธรรมชาติที่ได้จากพืชมีบทบาทมากที่สุดซึ่งส่วนต่างๆ ของพืชที่ให้สีมีมากมายหลายชนิด ได้แก่ ลำต้น แก่น เปลือก ใบ ดอก และผล โดยสีที่ได้จากส่วนที่เป็นราก แก่น และผล ให้สีที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าส่วนอื่นๆ การที่พืชให้สีที่แตกต่างกันเนื่องจากในพืชนั้นมีองค์ประกอบของสารให้สีที่แตกต่างกัน โดยสารให้สีเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ [21]

(ก) สารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) สารให้สีกลุ่มนี้ถูกนำมาใช้ย้อมสิ่งทอเป็นจำนวนมาก โดยสารกลุ่มนี้มักให้สีที่มีสีเหลืองถึงสีส้มอมเหลือง มีสูตรโครงสร้างพื้นฐานเป็น $C_6-C_3-C_6$ โดยที่ C_6 ส่วนมากเป็นพวงวงเบนซิน มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9



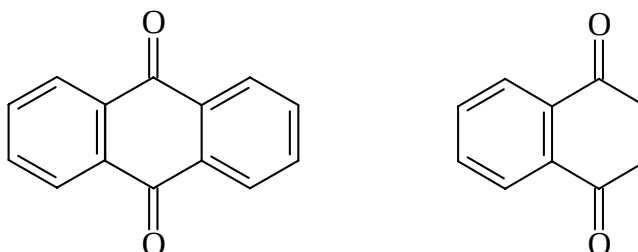
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสารให้สีฟลาโวนอยด์ [21]

(ข) สารประกอบเทอร์พีนอยด์ (Terpenoids) สารในกลุ่มนี้เป็นสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากสิ่งมีชีวิตโดยมีหน่วยโครงสร้างเป็นพวกไอโซโพรเพน เช่น โครซีทิน (Crocetin) จากหญ้าฝรั่น (Saffron) มีสีเหลือง ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10



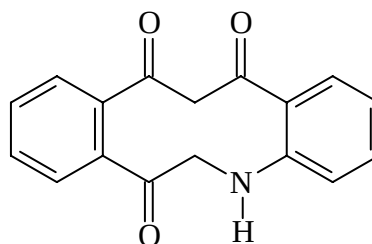
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของโครซีทิน [21]

(ค) สารประกอบแอนทราควิโนน และแนฟทาควิโนน (Anthraquinones and naphthaquinones) สารในกลุ่มนี้มักให้สีแดงของแอนทราควิโนนที่ใช้เป็นสีย้อม เช่น เอลิเอลิน (Aliarin) จากรากต้นแมดเดอร์ (Madder) และจากแก่นต้นยอ จากครั่ง (Laccaic acid) ส่วนแนฟทาควิโนน เช่น Juglone จากเปลือกมันฮ่อให้สีเขียวอมน้ำตาล มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสารให้สีแดงแอนทราควิโนนและแนฟทาควิโนน [21]

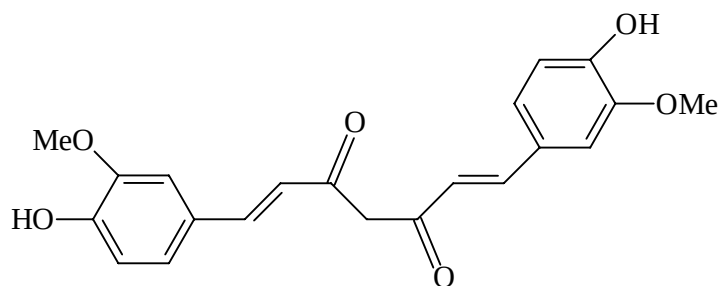
(ง) สารประกอบแอลคาลอยด์ (Alkaloids) สารในกลุ่มนี้มักจะได้จากพืชชั้นสูงและมีไนโตรเจนอะตอมอยู่ในโมเลกุล ได้แก่ ลีอินดิโก (Indrigo) จากต้นคราม ซึ่งให้สีน้ำเงิน มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสารให้สีอัลคาลอยด์ [21]

2.6.2 ขมิ้นและกรรมวิธีในการย้อมสีธรรมชาติ [21-23]

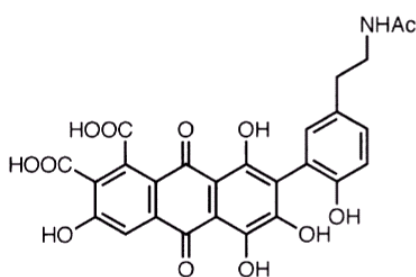
ขมิ้นมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Curcuma longa* พบได้เกือบทั่วทุกภาคของประเทศไทย นิยมนำมาใช้เป็นเครื่องเทศ สีส้มอาหารและสีย้อมผ้า โดยสารให้สีหลักในขมิ้นมีชื่อว่า เคอคูมิน (Curcumin) (รูปที่ 2.13) จัดเป็นสารในกลุ่มสีฟลาโวนอยด์ สารประเภทนี้เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดสีเหลืองในขมิ้นจึงมักมีผู้นิยมนำสารเหล่านี้ที่สกัดได้จากขมิ้นไปใช้เป็นสีผสมอาหารและสีย้อมผ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการย้อมผ้า นั้นมักนำไปใช้ย้อมพวกผ้าฝ้ายและผ้าไหม



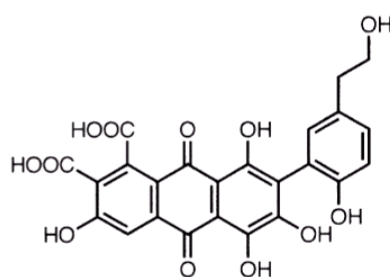
รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของเคอคูมิน (Curcumin) [23]

2.6.3 สีย้อมครั่งและกรรมวิธีในการย้อมสีธรรมชาติ [24-25]

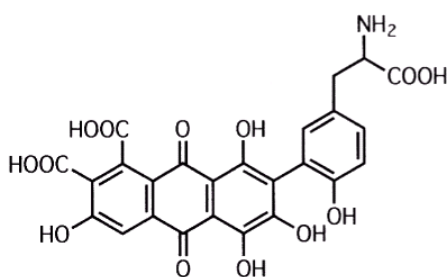
สีครั่งเป็นสีย้อมธรรมชาติที่สกัดจากสารที่ขับถ่ายออกมาของแมลง *Coccus laccae* (*Laccifer lacca kerr*) ซึ่งก็คือตัวครั่ง และใช้อย่างมากในสีผสมอาหารและการย้อมสีสิ่งทอ เช่น ไหม ฝ้าย และ ขนแกะ ซึ่งอาจใช้สำหรับการทาสีน้ำมัน (Oil painting), ในน้ำมันเคลือบเงาและอาจใช้ในสีน้ำด้วย ครั่งดิบมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เรซิน 70-80% แวกซ์ 6-7% สี 4-8% รวมทั้งสารเจือปน 15-25% สีครั่งสามารถแบ่งสารได้เป็น 2 กลุ่ม คือ (1) Laccic acid A, B, C และ E โดยมี Laccic acid A และ B เป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งหมดนี้เป็นสารที่ละลายน้ำได้ให้เม็ดสีเป็นสีแดงและ (2) Erythrolaccin ซึ่งละลายในแอลกอฮอล์ให้สีเหลือง [24]



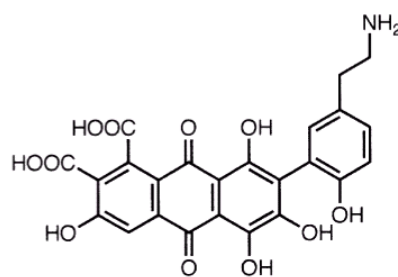
Laccic acid A (M.W.; 537)



Laccic acid B (M.W.; 496)



Laccic acid C (M.W.; 539)



Laccic acid E (M.W.; 495)

รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Laccic acid A, B, C และ E [25]

การย้อมสีธรรมชาติมีขั้นตอนที่สำคัญอยู่ 2 ขั้นตอน คือ การย้อมโดยตรงและการย้อมโดยใช้มอร์แดนต์ โดยสารให้สีบางชนิดที่สกัดจากพืชสามารถย้อมติดกับเส้นใยบางชนิดได้ดี เช่น ฝ้าย ลิ้นจี่ แต่อาจจะย้อมติดกับเส้นใยบางชนิดได้ไม่ดี เช่น ไหมและขนสัตว์ ตลอดจนสารให้สีบางชนิดที่สกัดจากพืชเมื่อนำมาย้อมกับผ้าหรือเส้นใยแล้ว ผ้าหรือเส้นใยที่ได้จากการย้อมกับสีย้อมเหล่านี้ อาจให้สมบัติความคงทนของสีต่อการซักและสภาวะแวดล้อมบางอย่างไม่ดี การย้อมแบบใช้มอร์แดนต์ จะช่วยให้เกิดการย้อมติดระหว่างตัวสีกับเส้นใยดีขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการย้อมแบบนี้ คือ เมื่อเส้นใยที่ได้ผ่านการย้อมสีและการย้อมด้วยสารละลายมอร์แดนต์แล้ว โลหะของสารละลายมอร์แดนต์จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่แข็งแรงกับสีและเส้นใย ทำให้สีที่ได้จากการย้อมด้วยวิธีนี้มีความคงทน ไม่ตกสีหรือซีดง่าย สารมอร์แดนต์ที่ใช้ คือ สารละลายของเกลือโลหะ ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ คอปเปอร์ซัลเฟต และโพแทสเซียมอะลูมิเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นต้น โดยมอร์แดนต์แต่ละตัวเมื่อนำมาย้อมร่วมกับสีย้อมธรรมชาติแล้วอาจให้ผลสีที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของมอร์แดนต์ที่นำมาใช้ย้อมรวมทั้งชนิดของสีย้อมที่นำมาใช้ [26-27]

- มอร์แดนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อทางเคมี	Potassium Aluminium Sulphate (สารส้ม)
สูตรโมเลกุล	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
คุณสมบัติ	ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ทำลายโอโซน ไม่เสื่อมสภาพ มีความคงทน สารส้มเป็นสารประกอบที่มีไอออนของอลูมิเนียม ซึ่งสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสูตรโครงสร้างทางเคมีของสีและเส้นใยของผ้าทำให้สีเข้มขึ้นและติดบนเส้นใย นอกจากนี้สารส้มมีคุณสมบัติเป็นกรด อาจทำให้ผลสีเปลี่ยนไปได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลลิตา บุญโสม [28] ได้ทำการศึกษาการลอกกาวยด้วยสารเคมี ได้แก่ กรดทาร์ทาริก โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต และไตรเอทิลเอมีน ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าความสามารถในการลอกกาวยของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น และเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวยด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และศึกษาการตอกรด้วยไวนิลมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ MAA และ MMA ที่อัตราส่วนระหว่าง MAA และ MMA ต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ไหมที่ตอกรมีปริมาณพอลิเมอร์บนเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลากการตอกรมากขึ้น การตอกรด้วย MAA ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 15 นาที ให้สมบัติเชิงกลและลักษณะของเส้นใยดีที่สุด และพบว่าไหมที่ตอกรด้วย MMA และ MAA ผสม MMA มีพื้นผิวที่ขรุขระเนื่องจากโอลิโกเมอร์ของ MMA บนเส้นใย ส่วนไหมที่ตอกรด้วย MAA มีลักษณะพื้นผิว

เรียบขึ้น เมื่อนำไหมที่ผ่านการดอกลงไปทำการย้อมสีด้วยสีย้อม 2 ชนิด คือ สีแอซิด (Acid dye) และ สีเบสิก (Basic dye) พบว่าไหมที่ดอกลงด้วย MAA มีความคงทนของสีสูงกว่าไหมที่ไม่ผ่านการดอกลง นอกจากนี้ไหมที่ย้อมด้วยสีแอซิดมีความคงทนของสีมากกว่าที่ย้อมด้วยสีเบสิก และการวิเคราะห์ โครงสร้างหลักของไฟโบรอินในเส้นใยไหมด้วยเทคนิค FTIR ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใน โครงสร้างหลักของเส้นใยไหมเนื่องจากการลอกกาบ การดอกลงหรือการย้อมสี

วัฒนา คล้ายรัศมี [29] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพของไหม ที่ดอกลงด้วย MMA และ MAA ในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 พบว่าความสามารถในการดอกลงของเส้นใยที่ดอกลงด้วย MMA และเส้นใยที่ดอกลงด้วย MAA ลดลงเมื่ออัตราส่วนของเอทานอลในตัวทำละลายผสมเพิ่มขึ้นแต่ ความสามารถในการดอกลงของเส้นใยที่ดอกลงด้วย MMA กับ MAA มีความสามารถในการดอกลง ใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนของตัวทำละลายผสม นอกจากนี้สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของ เส้นใยที่ดอกลงด้วย MMA ในตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วน 25:75 และ 0:100 เส้นใยที่ดอกลงด้วย MAA และเส้นใยที่ดอกลงด้วย MMA กับ MAA ในตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วน 25:75 ให้พื้นผิวที่มี ลักษณะเรียบสม่ำเสมอเหมาะแก่การนำไปใช้งานในรูปสิ่งทอแต่สมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ดอกลง ลดลงเมื่อเทียบกับเส้นใยไหมลอกกาบ จากการศึกษาโครงสร้างของไหมที่ดอกลงด้วยเทคนิค ฟลูอริสเซนซ์ฟลูออโรสโคป (Fluorescence Microscopy) เส้นใยที่ได้มีลักษณะเฉพาะของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการ ดอกลง นอกจากนี้เส้นใยที่ดอกลงด้วย MAA ในตัวทำละลายน้ำมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงสุด ส่วนเส้นใยที่ดอกลงมีความคงทนต่อการดอกลงและด่างสูงขึ้นยกเว้นเส้นใยที่ดอกลงด้วย MAA ที่เปอร์เซ็นต์ การดอกลงสูงๆ มีความคงทนต่อการดอกลงลดลง นอกจากนี้เส้นใยที่ดอกลงมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น ในส่วนของการย้อมสีเส้นใยที่ดอกลงด้วยสีย้อมจากขมิ้น สีย้อมแอซิด และสีย้อมเบสิกพบว่าเส้นใยที่ ดอกลงมีความสามารถในการดูดซับสี ความคงทนต่อแสง การซัก และแห้งสูงกว่าไหมลอกกาบ

S.Chopra และคณะ [31] ยังได้ทำการศึกษาผลของสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการลอกกาบผ้าไหม มัลเบอร์รี่ (Mulberry silk fabric) ที่มีต่อความสามารถในการสัมผัส ซึ่งสารเคมี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สบู่ กรด ด่าง ไตรเอทิลเอมีน (Triethylamine, TEA) และเอมไซม์ โดยได้ใช้ค่าการสัมผัสของ ผ้าไหมที่ทำการลอกกาบด้วยสบู่เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบ ซึ่งจากการทดลองพบว่า สารเคมีเหล่านี้เมื่อลอกกาบให้ประสิทธิภาพในการลอกกาบใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบในเชิง น้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) แต่จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่บริเวณระหว่างพื้นผิว (Interface) ของเส้นใยพบว่า ผ้าไหมที่ทำการลอกกาบด้วยสบู่ ด่าง ไตรเอทิลเอมีน มีประสิทธิภาพในการลอกกาบดีกว่าการ ลอกกาบด้วยเอมไซม์และกรด ส่วนการศึกษาสมบัติเชิงกลแบบความเค้นต่ำ (Low stress properties) พบว่าผ้าไหมที่ทำการลอกกาบโดยใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน ให้สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ส่วนค่า การสัมผัสผ้าไหมมัลเบอร์รี่ที่ทำการลอกกาบด้วยสบู่และด่างให้ความนุ่ม (Softness) ความยืดหยุ่น

(Flexibility) และความรู้สึกเมื่อถูกดีดที่สุด ส่วนผ้าไหมที่ทำการลอกกาวด้วยเอมไซม์ทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะที่แข็งและเปราะ ส่วนผ้าไหมที่ทำการลอกกาวด้วยไทรเอทิลเอมีนให้ค่าการสัมผัสอยู่ในระดับกลาง

M.Tsukada และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาค่าการดักของเส้นใยไหมกับมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ MAA HEMA และ MMA โดยใช้ตัวเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate, APS) เอโซบิสไอโซบิวไทโรไนไตร (Azobisisobutyronitrile, AIBN) และ เอโซบิสเมทิลโพรพิโอนามิดีนไดไฮโดรคลอไรด์ (Azobismethylpropionamidine dihydrochloride, ADC) พบว่าตัวเริ่มต้นแต่ละชนิดมีความสามารถในการดักตามลำดับดังนี้ $APS > AIBN > ADC$ ซึ่งความเหลืองของเส้นใยไหมที่ถูกดักเปลี่ยนตามชนิดของตัวเริ่มต้นและมอนอเมอร์ที่ใช้ โดย APS ที่ใช้เป็นตัวเริ่มต้นมีผลต่อความเหลืองของเส้นใยไหมมากที่สุด ในขณะที่การดักเส้นใยไหมด้วย MAA ทำให้เส้นใยมีความเหลืองน้อยที่สุดเมื่อใช้ตัวเริ่มต้นทุกชนิด ส่วนความชื้นรีเทน (Moisture regain) ของเส้นใยไหมที่ดักด้วย MAA พบว่ามีความชื้นเพิ่มขึ้น และเส้นใยที่ดักด้วย MMA มีความชื้นลดลง ขณะที่ความของเส้นใยที่ดักด้วย HEMA ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากความชื้นของเส้นใยขึ้นกับความชอบน้ำ (Hydrophilic) หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของมอนอเมอร์ ส่วนสมบัติการดึงยึด (Tensile properties) มีแนวโน้มที่ลดลงขณะที่น้ำหนักของเส้นใยไหมที่ถูกดักเพิ่มขึ้น (Weight gain) นอกจากนี้พบว่า เส้นใยไหมที่ดักด้วย HEMA และ MMA มีพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดไฮโดรพอลิเมอร์มาเกาะที่พื้นผิว ขณะที่การดักด้วย MAA ทำให้เส้นใยมีพื้นผิวเรียบ

นอกจากนี้ M.Tsukada และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาเส้นใยไหมพันธุ์บอมบิกซ์โมริ (*Bombyx mori*) โดยนำมาดักด้วยมอนอเมอร์ชนิดใหม่ คือ VTMSi ที่ใช้ตัวเริ่มต้นแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ APS ADC และ AIBN พบว่าความสามารถในการดักของตัวเริ่มต้นแต่ละชนิดไม่เท่ากันตามลำดับดังนี้ $AIBN > APS > ADC$ และจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยไหมที่ดักด้วย VTMSi โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและดัชนีการหักเหของแสง พบว่าเกิดพอลิเมอร์ร่วมของ VTMSi ภายในเมทริกซ์เส้นใยและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง (Thermal stability) สำหรับความแข็งแรงดึงของเส้นใยและการดึงยึด ณ จุดขาดของเส้นใยลดลงเมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การคืนตัวจากรอยยับ (Crease recovery) ในสภาวะที่เปียกของเส้นใยดีขึ้นเมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นมากกว่า 10% ทำให้เส้นใยมีความทนทานต่อการซักมากขึ้น

M. Tsukada และคณะ [34] ยังได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของไหมที่ดักด้วย HEMA พบว่าความแข็งแรงดึงและการยืดของไหมที่ดักทั้งในสภาวะแบบแห้งและเปียกลดลงเมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่วนมอดูลัสยืดหยุ่น (Initial modulus) ของไหมที่ดักในสภาวะแบบแห้งที่เปอร์เซ็นต์การดักในช่วง 0-16% เพิ่มขึ้นถัดจากนั้นค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลงต่ำกว่าไหมที่ไม่ได้ดัก จากการศึกษาโครงสร้างของไหมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่า

IR สเปกตรัมของไหมที่ต่อกึ่งเกิดแถบการดูดกลืนที่เลขคลื่น 1724 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่เอสเทอร์ของ HEMA สำหรับการวัดค่าดัชนีหักเหทั้งในแนวนอนและแนวตั้งฉากกับแกนเส้นใย ปรากฏการณ์ไบฟริงเจนซ์ (Birefringence) และดัชนีหักเหแบบไอโซทรอปิก (Isotropic refractive index) มีค่าลดลงทำให้ระดับของความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) และการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ต่อกึ่งลดลงและจากการศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของเส้นใยด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) พบว่า HEMA ที่ใช้ในการต่อกึ่งไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของเส้นใยไหม ส่วนฐานฐานวิทยาของเส้นใยที่ต่อกึ่งด้วย HEMA ที่เปอร์เซ็นต์การต่อกึ่ง 32% มีลักษณะผิวของเส้นใยเรียบสม่ำเสมอคล้ายคลึงกับไหมก่อนต่อกึ่ง นอกจากนี้เส้นใยที่ต่อกึ่ง HEMA มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

M. Tsukada และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและลักษณะเส้นใยที่ทำการต่อกึ่งด้วย MMA พบว่าการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นไหมที่มีเปอร์เซ็นต์การต่อกึ่ง 30% โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี แสดงให้เห็นพิกเอนโดเทอริก 2 ส่วนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $326\text{ }^{\circ}\text{C}$ และในช่วง $390\text{--}410\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิสลายตัวของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบ β และอุณหภูมิการสลายตัวของโครงสร้าง PMMA ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งตามลำดับ ในขณะที่การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์มัลกราวิเมทรี แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่นำมาต่อกึ่งกับมอนอเมอร์ชนิดนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่การศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยไหมโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) พบว่ามอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการต่อกึ่งไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อโครงสร้างที่เป็นผลึกของเส้นใย

M. Tsukada และคณะ [32] ศึกษาโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว สมบัติเชิงกายภาพ สมบัติทางความร้อนและความสามารถในการติดสีของเส้นใยไหมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเอทอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Ethoxyethylmethacrylate, ETMA) ใช้ APS เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ $60\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเวลา 0-90 นาที พบว่าการเพิ่มของพอลิเมอร์บนเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 60 นาที จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR Spectroscopy) แสดงให้เห็นแถบการดูดกลืน (Absorption band) ที่ซ้อนทับกันแสดงให้เห็นถึงความเหมือนกันของโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใยก่อนและหลังการปรับปรุงด้วย ETMA แสดงถึงการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของ ETMA ในเมตริกซ์ของเส้นใยไหม และจากการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบลักษณะของแผ่น (Granule) ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอของเอทอกซีเอทิลเมทาคริเลตโอลิโกเมอร์ (ETMA oligomer) บนพื้นผิวของเส้นใย ส่วนอุณหภูมิในการสลายตัวของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) สมบัติทางแรงดึงเมื่อผ่านการปรับปรุงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ความสามารถในการติดสีของชนิดกรด (Acid dye) เพิ่มขึ้นมากเมื่อเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันของ ETMA บนเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น

G. Freddi และคณะ [34] ทำการศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางแรงดึง และสมบัติทางความร้อนของเส้นใยไหมบ้านที่ผ่านการดอกร้างด้วย MAA และ HEMA ในตัวกลางที่เป็นน้ำ APS เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเตรียมเส้นใยที่มีปริมาณพอลิเมอร์บนเส้นใยได้ถึง 300% โดยที่น้ำหนักของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณของมอนอเมอร์ที่มีในระบบการเกิดปฏิกิริยา โดยเกิดโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เพียงเล็กน้อยในระบบที่ดอกร้างด้วย MAA ในขณะที่มีปริมาณโฮโมพอลิเมอร์ของ PHEMA เกิดขึ้นที่พื้นผิวของเส้นใยมากกว่า 70% ซึ่งขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของตัวอย่างเพิ่มขึ้น และปริมาณความชื้น (Moisture content) ของเส้นใยที่ผ่านการดอกร้างด้วย MAA เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณในการดอกร้างเพิ่มขึ้น แต่สภาวะในการดอกร้างที่รุนแรงเป็นผลให้เกิดการสลายตัวของเส้นใยบางส่วนส่งผลให้สมบัติทางแรงดึงและความขาวของเส้นใย (Degree of fiber whiteness) ลดลง เส้นใยหลังจากผ่านการดอกร้างมีค่าทนต่อการแตกหักสูงขึ้นเล็กน้อย การยืด ๓ จุดขาดลดลง แต่อ่อนหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้น

นฤมล ศราพันธุ์ [26] ได้ทำการศึกษาการย้อมสีผ้าไหมด้วยขมิ้นชัน โดยใช้มอร์แดนท์ 4 ชนิด คือ เหล็ก จุนสี กรดน้ำส้มและสารส้ม ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 2 % 4 % 6% และ 8% ของน้ำหนักไหม ระยะเวลาที่ใช้ในการย้อม คือ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 80-85 °C จากผลการทดลองพบว่า การใช้มอร์แดนท์ต่างชนิดกันให้เฉดสีต่างกัน และจากการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักทั้ง 3 วิธี พบว่าเมื่อใช้เหล็ก 6 เปอร์เซ็นต์ จุนสี 2 เปอร์เซ็นต์และสารส้ม 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไหม ให้ค่าความคงทนของสีต่อการซักสูงสุด ส่วนการทดสอบความคงทนของสีต่อแสง พบว่าการย้อมโดยใช้จุนสีเป็นมอร์แดนท์ในทุกระดับให้ค่าความคงทนต่อแสงสูงสุด

ไพศาล คงกาญจนา [19] ได้ทดลองย้อมสีเส้นไหมพันธุ์ไทยพื้นเมืองเกรด 3 ที่ผ่านการฟอกขาวด้วยสีจากครั่งโดยใช้สารช่วยติด (Mordant) ชนิดต่างๆ พบว่าการใช้สารช่วยติดต่างชนิดมีผลต่อสีของไหม และเมื่อทดลองใช้สารช่วยติดที่ความเข้มข้นต่างกันมีผลต่อความเข้มของสีที่ติดไหม สำหรับขั้นตอนการใช้สารช่วยติด ก่อน พร้อม และหลังการย้อมสีครั้ง มีผลต่อความเข้มของสีที่ได้เฉพาะกับสารช่วยติดบางชนิดเท่านั้น เมื่อนำเส้นไหมที่ผ่านการย้อมมาทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก พบว่าเส้นไหมที่ผ่านการย้อมส่วนใหญ่มีคุณภาพในด้านความคงทนของสีต่อการตกสี อยู่ในระดับดี-ดีมาก แต่มีความคงทนของสีต่อการเปลี่ยนสีอยู่ในระดับที่ต่ำมาก-ต่ำ และมีความคงทนของสีต่อแสงขึ้นอนอาร์กอยู่ในระดับปานกลาง-ดี การใช้สารช่วยติดที่ความเข้มข้นต่างกันและวิธีย้อมที่ต่างกันมีผลทำให้ไหมที่ได้มีคุณภาพสีใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาเลือกสารช่วยติดที่ดีที่สุดในการย้อมไหมด้วยสีจากครั่ง พบว่ามีสารช่วยติด 5 ชนิดที่ให้ผลต่อคุณภาพสีของเส้นไหมหลังการย้อมดีที่สุดในแต่ละด้าน คือ น้ำจากใบเหมือดผสมน้ำมะขาม อะซิติก 0.5 โมล/ลิตร ซัลฟูริก 0.4 โมล/ลิตร ทาร์ทาริก 0.5 โมล/ลิตร และฟอร์มิก 0.1 โมล/ลิตร ที่ให้ผลต่อคุณภาพของสีของไหมหลังย้อมดีที่สุด