บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 เส้นใยสิ่งทอ [8]

เส้นใยสิ่งทอ คือวัสดุที่ความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่หน้าตัดตามขวางไม่น้อยกว่า 100 เท่า เส้นใยสิ่งทอสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ เช่น เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม เครื่องประดับ เฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ยังมีความสำคัญในกระบวนการทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การนำเส้นใยไปทำเป็นผ้าหุ้มเบาะ และที่สำคัญในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเส้นใยสิ่งทอเพื่อนำไปใช้ในทางการแพทย์ โดยนำมาทำเป็นอวัยวะเทียม เช่น ลิ้นหัวใจกำมะหยี่พอลิเอสเทอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยสิ่งทอที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะถูกแบ่งชนิดของเส้นใยได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มของเส้นใยธรรมชาติและกลุ่มของเส้นใยประดิษฐ์ ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยธรรมชาติ [8]

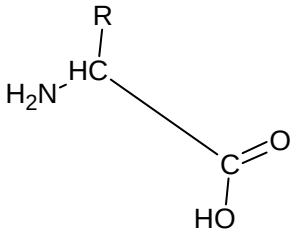
กลุ่มเส้นใย	ชนิดของเส้นใย
เซลลูโลส (เส้นใยพืช)	ฝ้าย (cotton) ลินิน (linen) ปอ (jute) รามี (ramie) ป่าน (hemp) นุ่น (kapok)
โปรตีน (เส้นใยสัตว์)	ขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ผม (hair)
แร่	แร่ใยหิน (asbestos)
ยาง	ยาง (rubber)

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยประดิษฐ์ [8]

กลุ่มเส้นใย	ชนิดของเส้นใย
เซลลูโลส	เรยอน (rayon) ไลโอเซลล์ (lyocell) อะซิเทต (acetate) ไตรอะซิเทต (triacetate)
พอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส	โอเลฟินส์ (olefins) พอลิเอสเทอร์ (polyester) ซาราน (saran) สแปนเด็กซ์ (spandex) ไวเนียน (vinyon) อะคริลิก (acrylic) มอดอะคริลิก (modacrylic) อะรามิด (aramid) ไนลอน (nylon) โนโวลอยด์ (novoloid)
แร่และเหล็ก	โลหะ (metallic) แก้ว (glass) เซรามิก (ceramic) กราไฟต์(graphite)

2.1.1 เส้นใยโปรตีน

เส้นใยโปรตีน คือเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ เช่น ไหม ขนแกะแม้ว่าในปัจจุบันเส้นใยประดิษฐ์จะมีปริมาณการผลิตสูงขึ้น แต่ความต้องการเส้นใยโปรตีนก็ไม่ได้ลดลง เนื่องจากเส้นใยโปรตีนจะมีลักษณะเฉพาะตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรรมชาติหลาย ๆ อย่าง เส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบหลักที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของโพลีเปปไทด์ของกรดอะมิโนเป็นสายโซ่ยาว จึงทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง ซึ่งธาตุหลักๆ ที่ประกอบในโมเลกุล คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน โปรตีนของเส้นใยไหมเรียกว่า ไฟโบรอิน (fibroin) และโปรตีนของขนสัตว์เรียกว่า เคราติน (keratin) โดยเส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเป็นกรดและเบสในโครงสร้างเดียวกัน ดังรูปที่ 2.1



หมู่อะมิโน หมู่คาร์บอกซิล

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของกรดอะมิโน[8]

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยโปรตีนจะมีสมบัติต่างๆ ที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากเส้นใยโปรตีนมีลักษณะโครงสร้างหลักทางเคมีที่เหมือนกัน ซึ่งสมบัติต่างๆ สามารถบ่งบอกได้ถึงการใช้งานและการดูแลเก็บรักษาให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับผู้บริโภค โดยสมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ [8]

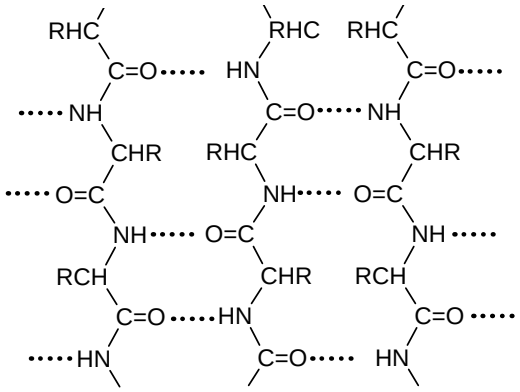
สมบัติ	ความสำคัญต่อผู้ใช้
การคืนตัว	- ป้องกันการยับ - รอยยับย่นสามารถทำให้หายได้โดยการแขวนทิ้งไว้หลังการใช้
การดูดซึมความชื่นดี	- สวมใส่สบายในสภาพภูมิอากาศที่เย็นชื่นและการดูดซึมน้ำดี - ทำให้พรมขนสัตว์ไม่เปราะแตกง่าย
ความแข็งแรงลดลงเมื่อเปียก	- ต้องระวังในขณะซักล้าง - ขนสัตว์มีความแข็งแรงลดลง 40% ในขณะที่ไหมลดลง 15%

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่เหมือนกันในเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ (ต่อ)

ความถ่วงจำเพาะต่ำ	- ผ้าขนสัตว์น้ำหนักเบากว่าผ้าที่ทำจากเส้นใยพืชที่ความหนาเท่ากัน
ถูกทำลายได้ด้วยด่าง	- ต้องใช้สบู่หรือน้ำยาซักล้างที่เป็นกลางหรือด่างอ่อน - เหงื่อจะมีโอกาสทำให้ความแข็งตัวลดลง
ถูกทำลายได้ด้วยสารที่ทำให้เกิดการออกซิไดส์	- สารซักฟอกประเภทคลอรีนจะไปทำลายเส้นใยจึงควรหลีกเลี่ยง - แสงแดดทำให้ผ้าเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง
ถูกทำลายได้ด้วยความร้อนแห้ง	- ขนสัตว์กระด้าง เปราะ และหลอมง่ายด้วยความร้อนแห้ง - ผ้าเกิดการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองได้
ทนต่อเปลวไฟ	- เผาไหม้ไม่หมด ดับไฟได้ด้วยตัวมันเองให้กลิ่นเหมือนการเผาเส้นผมโดยมีขี้เถ้าสีดำและสามารถบดแตกได้

2.1.2 เส้นใยไหม [9-10]

ไหมเป็นเส้นใยยาวที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ มีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นโปรตีนที่มีสมบัติที่ดีเหมาะแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบาย ความสวยงาม ซึ่งไหมถูกจัดเป็นเส้นใยที่มีความหรูหรา และมีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง เช่น มีความเงางามตามธรรมชาติ มีชีวิตชีวา และยังมีความแข็งแรงสูง ลักษณะโครงสร้างเกิดจากการต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวของกรดอะมิโน โดยมีการเรียงต่อกันด้วยแขนแอไมด์หรือเปปไทด์ ไหมมีปริมาณซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่น้อยมากจนเกือบไม่พบ อีกทั้งโมเลกุลไหมจะมีการจัดเรียงตัวยาวเป็นระเบียบส่งให้มีความแข็งแรงสูง เส้นใยไหมดิบมีความหนาประมาณ 24-30 μm เส้นใยไม่สม่ำเสมอ เพราะมีกาวติดอยู่รอบเส้นใย ในรังไหมหนึ่งรังจะได้เส้นใยไหมยาวประมาณ 400-700 m ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่นับเป็นเส้นใยยาว ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยไหมแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยประกอบด้วย เส้นใยโปรตีนเรียกว่า fibroin และ sericin หรือกาวไหมเป็นส่วนใหญ่ และนอกจากนี้ยังมี น้ำ แร่ธาตุ และแว๊กซ์ องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหมแสดงได้ดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไหม[9]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหม

องค์ประกอบที่สำคัญ	ปริมาณในเส้นใย (เปอร์เซ็นต์)
Sericin	22-25
Fibroin	62.5-67
น้ำ	10-11
เกลือและอื่นๆ	1-1.5

สมบัติต่างๆ ของเส้นใยไหมสามารถแบ่งได้เป็น สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพของไหม

1.1 ลักษณะภายนอก ไหมดิบจะมีลักษณะของเส้นใยคู่เกาะติดกันด้วยกาวไหม ผิวนอกดูเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย

1.2 ความยาวของเส้นใย ไหมมีความยาวมากและเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาว ความยาวโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 400-700 m

1.3 สี ไหมมีสีตั้งแต่เหลืองไปจนถึงเทา

1.4 ความมัน หลังจากลอกกาวไหมออกแล้วมีความมันดีมาก

1.5 ความแข็งแรง ไหมเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากไหมมีลักษณะที่เป็นเส้นใยยาวอย่างต่อเนื่อง มีพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวสม่ำเสมอ และมีผิวที่เรียบมัน ในขณะที่แห้งไหมมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดอยู่ที่ 3.5-5.0 g/dm^{3}และความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยขณะเปียก

1.6 สภาพยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นตัวได้ดี โดยเส้นใยไหมสามารถยืดได้ถึง 15-20% ของความยาวเดิมก่อนขาดและสามารถคืนกลับที่ความยาวเดิมได้อย่างช้าๆ แม้ว่าเส้นใยจะมีความเรียบสม่ำเสมอแต่ก็มีผิวสัมผัสที่ไม่นุ่มเหมือนขนแกะและมีความแข็งเล็กน้อย

1.7 การคืนตัวจากแรงอัด ไหมมีความสามารถในการคืนตัวได้ดี ไม่เกิดการยับย่นง่าย

1.8 ความสามารถในการดูดซึมความชื้น ไหมมีความสามารถในการดูดความชื้นที่ดี เนื่องจากที่ภาวะมาตรฐานไหมมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นอยู่ที่ 11% จึงทำให้มีความสามารถในการดูดสีย้อมและสารตกแต่งที่ดีอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถดูดสารชนิดอื่นเช่น เกลือของโลหะต่างๆ เข้าไปเก็บไว้ภายในเส้นใยได้ ดังนั้นการซักน้ำหรือการตกแต่งผ้าไหมด้วยน้ำที่ไม่สะอาด มีเกลือของโลหะผสมอยู่จะทำให้ผ้าไหมขาดเร็ว

1.9 ความร้อน ไหมมีความสามารถในการทนความร้อนได้ถึง135 °C แต่ที่อุณหภูมิ 170 °C จะทำให้ไหมเกิดการเหลืองไหม้หรือสลายตัว ดังนั้นการรีดผ้าไหมจึงไม่ควรใช้ความร้อนสูงและเมื่อจะทำการรีดผ้าไหมขาวควรใช้ผ้าฝ้ายชื้นปิดข้างบน เนื่องจากผ้าไหมขาวสามารถเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ง่ายไหมจะเกิดการติดไฟง่าย แต่เมื่อเอาออกจากไฟก็จะดับได้เอง เถ้าที่เหลือเป็นเม็ดเล็กสีดำ เปราะ มีกลิ่นเหมือนขนนกไหม้ไฟ

1.10 สภาพนำความร้อน ไหมเป็นเส้นใยที่ไม่นำความร้อน จึงเหมาะที่จะนำมาตัดเป็นเสื้อผ้าที่ใช้ในฤดูหนาว แต่ในช่วงฤดูร้อนผ้าไหมที่ทอหลวมๆ ก็ยังสามารถนำมาตัดเป็นเสื้อผ้าได้ เนื่องจากความร้อนจากร่างกายสามารถแทรกผ่านช่องว่างของผ้าทอได้

1.11 การทำความสะอาด เนื่องจากผิวที่เรียบของเส้นใยจึงทำให้เส้นใยไหมไม่ติดฝุ่นจึงทำให้ไหมเป็นเส้นใยที่สะอาดจึงสามารถทำความสะอาดได้ง่าย ด้วยการใช้สบู่อ่อนหรือน้ำยาซักแห้ง

2. สมบัติทางเคมีของไหม

2.1 กรด ไม่ถูกทำลายด้วยกรดทั่วไป แต่กรดที่มีความเข้มข้นสูงจะละลายไหมได้ และกรดที่มีความเข้มข้นปานกลางจะทำให้ไหมหดย่น โครงสร้างของใยไหมดูดซึมกรดได้เร็วและเก็บไว้ภายในเส้นใยได้ด้วยทำให้ซักออกยาก

2.2 ด่าง ด่างที่มีความเข้มข้นสูงและมีอุณหภูมิสูงจะทำลายไหมได้ ดังนั้นในการซักล้างจึงควรใช้สารซักฟอกที่เป็นด่างอ่อนๆ เช่น สบู่

2.3 เกลือคลอไรด์ ไหมถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ เช่น เหงื่อ เมื่อสัมผัสเหงื่อที่เป็นกรด ผ้าไหมจะอ่อนแอลงและสีของผ้าจะเปลี่ยนไป

2.4 สารซักฟอก ไหมถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์

2.5 การทนต่อราและแมลง โดยปกติแล้วไหมจะไม่ขึ้นราง่ายได้ง่าย ยกเว้นแต่ถูกปล่อยทิ้งไว้ในภาชนะที่เปียกชื้นเป็นเวลานาน

2.6 แสงแดด ไหมอ่อนไหวต่อแสงแดด โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานาน ความแข็งแรงของผ้าไหมจะลดลงเร็วกว่าฝ้ายหรือผ้าขนแกะ เวลาเก็บจึงควรห่อด้วยผ้าหรือกระดาษสีดำ ไหมไม่นำกระแสไฟฟ้า แต่สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตได้ ไม่นำความร้อน ทำให้สวมใส่สบายและเส้นใยสามารถปรับอุณหภูมิภายในเส้นใยเองได้อย่างน้อยประมาณ 5 °C

2.7 การย้อมสี ไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมผ้าได้ดีมากจึงทำให้สีติดทนทาน ผ้าไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสีไม่เหมาะที่จะนำมาตัดเย็บเป็นผ้าม่านเนื่องจากเมื่อเจอแสงแดดเป็นเวลานานจะทำให้สีของผ้ามีความซีดจางได้ สีที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสีเส้นใยไหมคือสีย้อมชนิดแอซิด สีเบสิก หรือสีไดเรกซ์ และผ้าไหมนิยมทำผ้าพิมพ์เพราะผ้าไหมติดสีพิมพ์ได้ดีเช่นกัน

2.1.3 การพิจารณาคุณภาพเส้นใยไหม [11]

คุณลักษณะที่จะแสดงว่า ไหมดีหรือไม่นั้น พิจารณาจากสาเหตุ 8 ประการด้วยกัน ดังนี้

1. ใยไหมและเส้นด้ายต้องมีขนาดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด

2. ไหมควรมีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงที่ดี เนื่องจากเวลาทอจะได้ผ้าเนื้อเรียบสม่ำเสมอ

3. ไหมจะต้องมีความสดใสและเป็นมันสม่ำเสมอตลอดทั้งผืนผ้า

4. Crossing คือ ลักษณะที่ใยไหมพองเป็นแห่งๆ มักจะเกิดในระยะที่สาวหรือพันใยเมื่อนำใยไหมที่มีลักษณะเช่นนี้มาทอเป็นผืนผ้าจะทำให้ผิวผ้าขรุขระ

5. ขน เกิดจากการที่ใยขาดมาก กลายเป็นใยสั้นทำให้ปลายเส้นใยโผล่พ้นผิวผ้าขึ้นมามากเกินไป

6. เส้นด้ายมีจุดขาวๆ อยู่ประปรายทั่วไป เวลาย้อมสีจะติดไม่เท่ากัน

7. มีปุ่มปมของเส้นใยที่ขาดและพันกันอยู่ในเส้นใย

8. ห่วง เกิดจากการสาวไหมซึ่งดึงใยไหมออกมาแต่ละเส้นยาวไม่เท่ากัน ทำให้หย่อนเกิดเป็นห่วงในเส้นด้าย

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสีย้อม [9-10]

ในอดีตสีที่ใช้ในกระบวนการย้อมสีผ้าส่วนใหญ่ยังเป็นสีที่ได้มาตามธรรมชาติ เช่น สีย้อมที่ได้จากครั่งตัวเมียซึ่งจะมีสีม่วงแดง เหมาะสำหรับย้อมไหมและขนสัตว์ สีย้อมที่ได้จากแกนของต้น log wood จะมีสีดำ นิยมย้อมผ้าไหมแท้และผ้าฝ้ายสีดำ แต่ในปัจจุบันเพื่อให้สะดวกในกระบวนการย้อม สีสังเคราะห์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการย้อมสี เพราะสามารถหาได้ง่าย

สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด กระบวนการย้อมติดของสีบนเส้นใยเกิดจากการที่โมเลกุลของสีย้อมและเส้นใยรวมกันเกิดเป็นสารประกอบใหม่ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพ เช่น เส้นใยจะเกิดเป็นสีขึ้นมาโดยพันธะที่เกิดขึ้นในขณะที่สีย้อมแพร่เข้าไปละลายหรือย้อมติดในรูพรุนของเส้นใย คือพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) หรือพันธะไอออนิก (Ionic bond) ซึ่งเส้นใยทุกชนิดจะมีขนาดรูพรุนของเส้นใยไม่เท่ากัน และขนาดโมเลกุลของสีย้อมก็มีขนาดไม่เท่ากันอีกด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่จะทำให้สีย้อมเกิดการย้อมติดบนเส้นใยได้หรือไม่

โดยทั่วไปแล้วในกลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอได้จำแนกสีย้อมออกเป็น 11 ประเภท โดยจะจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ การเลือกใช้สีย้อมเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการการย้อมสีเส้นใย เพราะสีแต่ละประเภทจะมีสมบัติและวิธีการใช้ที่แตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกสีย้อมให้เหมาะกับเส้นใยที่ต้องการย้อม เช่น เส้นใยไหม ส่วนใหญ่จะใช้สีแอซิดในการย้อม ประเภทของสีย้อมสามารถจำแนกได้ดังนี้

1) สีแอซิด (Acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก สีแอซิดมีหลายเฉดสี ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนแกะ ไหม ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่านและยังเหมาะสำหรับใช้ย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เช่นไนลอน อะคลิริก สีแอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ ความคงทนของสีต่อแสงดีมาก ชนิดโครงสร้างของสีส่วนใหญ่คือ monazo และ anthraquinone สีย้อมที่ประกอบด้วยโลหะก็จัดเป็นสีแอซิด โดยโมเลกุลของโลหะ เช่น โครเมียม หรือ โคบอลท์ จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสี การย้อมด้วยสีแอซิดทำได้ทั้งวิธีย้อมแบบแช่และการย้อมแบบต่อเนื่อง การย้อมแบบแช่นิยมใช้ในการย้อมผ้าถัก ผ้าทอ และพรม ซึ่งสีแอสิดสามารถจำแนกตามลักษณะการย้อมได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1.1 Leveling Dyeing Acid Dyes การย้อมด้วยสีชนิดนี้จะทำให้สีสม่ำเสมอบนเส้นใย เนื่องจากสีย้อมสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี สีย้อมมีโมเลกุลขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการดูดติดของสีย้อมในรูพรุนของเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต (Glauber's salt) เพื่อช่วยชะลอการดูดซึมของสีในเส้นใย โดยทำการย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด มีค่า pH 2-3 ซึ่งสีชนิดนี้มีค่าความคงทนต่อแสงแดดดีแต่ความคงทนต่อการซักล้างไม่ดี

1.2 Milling Dyeing Acid Dyes สีย้อมชนิดนี้จะมีการกระจายตัวที่ไม่ดี โดยจะทำการย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดที่ pH 5.2-6.2 โดยไม่จำเป็นต้องเติมเกลือเพื่อช่วยชะลอการดูดติดของสีย้อม เนื่องจากน้ำย้อมที่มีค่า pH มากกว่า 4.7 การเติมเกลือลงไปกลับทำให้เร่งการดูดติดของสีย้อม ซึ่งสีย้อมชนิดนี้จะมีความคงทนต่อการซักล้างมากกว่ากลุ่ม 1

1.3 Neutral Dyeing Acid Dyes หรือ Super Milling ทำการย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกลางหรือมีความเป็นกรดน้อยที่สุด โดยที่อุณหภูมิต่ำสีย้อมจะกระจายตัวเป็นวุ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงจะกระจายตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งมีความคงทนต่อแสงและการซักล้างดี

2) สีไดเร็กท์ (Direct dye) หรือสีย้อมผ้า สารประกอบส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบเอโซ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอยู่ที่ประมาณ 400-1200 เป็นสีที่ได้รับความนิยมในการย้อมสีเส้นใยเซลลูโลส ที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถนำมาใช้ในการย้อมสีเส้นใยฝ้ายโดยไม่ต้องเติมสารช่วยติด สีย้อมและเส้นใยจะยึดติดกันด้วยพันธะทุติยภูมิซึ่งเป็นพันธะที่อ่อน เช่นพันธะไฮโจรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นสีย้อมจึงมีโครงสร้างโมเลกุล

ที่มีขนาดใหญ่และยาว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับเส้นใย โครงสร้างของสี จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีส่วนที่เป็นวงแหวน การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการย้อมจะทำให้สีย้อมเคลื่อนตัวเข้าไปละลายในตัวกลางได้ดีมากขึ้น โดยสีไดเร็กซ์จะมีความคงทนต่อการซักล้างต่ำ เพราะเมื่อทำการซักผ้าหลายๆ ครั้งจะทำให้ผ้ามีสีที่ซีดจาง แต่มีข้อดีคือ มีความคงทนของสีต่อแสง ใช้งานง่าย และราคาไม่แพง

3) สีเบสิก (Basic or cationic dye) ในบางครั้งอาจเรียกว่าสีแคทไอออนิก เนื่องจากโครโมฟอร์มีประจุบวก สีเบสิกจะใช้ย้อมเส้นใยที่มีหมู่ที่เป็นกรด โดยพันธะที่เกิดระหว่างสีกับเส้นใยคือ พันธะเกลือ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนแต่ความทนทานของสีแบสิกค่อนข้างไม่แน่นอน ขึ้นกับว่าใช้ย้อมเส้นใยชนิดใดคือ ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง แต่ถ้านำไปย้อมเส้นใยอะคริลิก จะมีความทนทานต่อแสงและความทนทานต่อการซักล้างจะอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก

4) สีดิสเพิร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการย้อมเส้นใยอะซิเทต เป็นเส้นใยที่ดูดน้ำได้น้อย สีดีสเฟิร์สเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติการกระจายที่ดี โดยจะกระจายตัวเป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ย้อมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ไนลอน และอะคลิริกได้อีกด้วย โดยสีดิสเพิร์สมีคุณสมบัติสีที่ทนแสงและการซักล้างค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด สารที่สำคัญอีกอย่างที่ใช้ในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยด้วยสีดิสเฟิร์สคือ สารพา (Carrier) เพื่อช่วยพาเอาสีย้อมเข้าไปในรูพรุนของเส้นใย สารช่วยกระจายตัว (dispersing agents) ซึ่งเป็นประเภทหนึ่งของสารลดแรงตึงผิว ประกอบด้วยส่วนที่ละลายได้ในน้ำและส่วนที่ละลายได้ในน้ำมันอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อเติมสารนี้ลงในน้ำ จะเกิดเป็นไมเซลล์ (micelle) โดยหันปลายด้านที่ไม่ชอบน้ำเข้าด้านใน และเป็นการช่วยในการละลายสีด้วย ส่วนด้านที่ชอบน้ำที่มีประจุลบจะหันออกด้านนอก ซึ่งทำให้ไมเซลล์แต่ละหยดผลักกัน เป็นการช่วยในการกระจายตัวของสีในน้ำ สีดิสเพิร์สกลุ่มใหญ่ๆ ประกอบด้วย monazo และ anthraquinone และเป็นสีที่ไม่มีประจุจึงทำให้ละลายน้ำได้น้อย

5) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนท์ในภาวะที่เป็นด่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 ^{o}C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกภาวะธรรมชาติของสีรีแอกทีฟจะทำปฏิกิริยากับน้ำ สีที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยจะเรียกว่า fixed dyes ส่วนสีที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า hydrolysed dyes ซึ่งข้อดีของสีรีแอกทีฟ คือ สีจะละลายน้ำได้ดี สีแพร่

เข้าสู่เส้นใยได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำ มีสีสดใส และ มีความคงทนต่อการซักล้างได้ดี เนื่องจากสีที่ย้อมติดในรูพรุนของเส้นใยจะยึดติดกันแน่น แต่มีข้อเสียคือ สีรีแอกทีฟสามารถยึดติดกับผิวเส้นใยได้น้อย เนื่องจากสีชนิดนี้มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็ก และยังทำให้เกิดปัญหาน้ำเสีย เพราะโครงสร้างของสีประกอบด้วยหมู่ซัลโฟเนตเพื่อช่วยในการละลายน้ำ ดังนั้นจึงต้องทำการล้างสีย้อมออกก่อนที่กระบวนการย้อมจะสิ้นสุด

6) สีอะโซอิค (Azoic dye) สีชนิดนี้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส แต่ไม่นิยมมากนักเนื่องจากมีเฉดสีที่จำกัด คือสีส้ม แดง เหลือง และอื่นๆ เล็กน้อย สีอะโซอิคถูกจัดเป็นสีอินแกรน (Ingran dye) คือสีจะก่อรูปในเส้นใยได้จะต้องเกิดจาการทำปฏิกิริยาของสาร 2 ชนิด คือ diazonium salt ซึ่งเป็นกลุ่มอนุพันธ์ของแอนนีลีนและ coupling component เป็นสารเคมีจำพวกเนพธอล โดยกระบวนการการย้อมสีชนิดนี้จะต้องเริ่มจากการเติม coupling component เข้าไปในเส้นใยก่อนโดยจะเกิดการแพร่เข้าไปเหมือนกับสีย้อม จากนั้นย้อมทับอีกครั้งด้วย diazonium salt จะได้เป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย สีอะโซอิคเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (Vat dye) สีย้อมชนิดนี้มีราคาแพงและมีขั้นตอนการย้อมที่ยุ่งยาก เหมาะที่นำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากสีแว็ตเป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำ ดังนั้นในกระบวนการย้อมจะต้องเตรียมน้ำย้อม โดยให้สีแว็ตทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้สีแว็ตสามารถรีดิวซ์กลายเป็นเกลือเข้าไปในรูพรุนของเส้นใย จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการย้อมแล้วไปผึ่งในอากาศเพื่อให้เกิดการออกซิไดส์ของสีย้อมในเส้นใยกลายเป็นสีแว็ต สีแว็ตโดยส่วนใหญ่มีความคงทนต่อแสงดีมาก ยกเว้นสีแว็ตชนิดอินดิโกที่ให้สีน้ำเงิน จะมีความคงทนของสีอยู่ในระดับต่ำ

8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or Chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลีเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้เหมาะสำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye) สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ในกระบวนการย้อมสีฝ้าย ซึ่งเป็นสีที่มีราคาถูก ไม่ทนต่อสารฟอกขาวที่มีคลอรีน สีซัลเฟอร์ในกลุ่มสีเข้มจะมีความทนทานต่อการซักล้างดีถึงดีมาก และความทนทานต่อแสงค่อนข้างดี ส่วนในกลุ่มสีอ่อนจะมีความคงทนของสี

ต่อแสงต่ำ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นเมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้

2.3 การย้อมสีเส้นใยสิ่งทอ [12]

การย้อมสีเป็นวิธีการหนึ่งในการตกแต่งผืนผ้าให้มีความสวยงาม สะดุดตา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากผู้บริโภคนิยมเลือกผลิตภัณฑ์จากสีสันก่อนการพิจารณาคุณภาพอย่างอื่นของผ้า ดังนั้นในกระบวนการย้อมสี จึงต้องทำให้สีมีความสม่ำเสมอ ไม่ย้อมด่าง สีย้อมติดทน ผู้ย้อมจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจในการเลือกสีย้อมและวิธีการย้อมให้เหมาะกับสิ่งทอ เพื่อให้กระบวนการย้อมดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ และในการย้อมสีจะขึ้นอยู่กันชนิดของเส้นใยด้วย เช่น ไหมควรใช้สีย้อมชนิด แอซิด รีแอกทีฟ เนื่องจากไม่มีด่างแก่เป็นส่วนผสมอยู่ เพราะเส้นใยไหมสามารถถูกทำลายได้ด้วยด่างแก่

กระบวนการย้อมสีเกิดได้จากการที่โมเลกุลของสีย้อมและเส้นใยรวมกันโดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่น การเกิดสีบนเส้นใย โดยโมเลกุลของสีย้อมจะต้องมีขนาดเล็กกว่ารูช่องว่างในเส้นใยจึงจะทำให้เกิดการติดสีได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านช่องว่างเข้าไปภายในเส้นใยแล้ว สีย้อมที่อยู่ในตัวกลางการย้อมจะซึมเข้าไปในเส้นใย ดังนั้นเส้นใยจะค่อยๆ มีโมเลกุลของสีรวมมากขึ้นทำให้สีมีความเข้มมากขึ้นด้วย ซึ่งเส้นใยทุกชนิดมีขนาดช่องว่าง และขนาดโมเลกุลของสีย้อมไม่เท่ากัน จึงเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้สีบางตัวย้อมเส้นใยบางชนิดไม่ติดหรือติดได้ ขั้นตอนที่สีย้อมผ่านเข้าสู่เส้นใยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การดูดซับของสีย้อมที่ผิวของเส้นใย (Sorption)** โมเลกุลของสีย้อมที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางการย้อมจะเคลื่อนตัวเข้ามาเกาะที่ผิวของเส้นใย ซึ่งแรงที่ช่วยในการยึดเกาะนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยและสีย้อม เช่น สีย้อมชนิดแอซิดจะสร้างประจุของสีย้อมในน้ำย้อมเป็นลบ และเมื่อทำการย้อมเส้นใยไหม ซึ่งไหมแสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในอ่างน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด ดังนั้น จะเกิดแรงในการดึงดูดระหว่างสีแอซิดและเส้นใย นอกจากนี้ ยังอาจมีแรงดึงดูดอื่นๆ ที่สำคัญเกิดขึ้นด้วย เช่น แรงดึงดูดที่ไม่ชอบน้ำ ที่ทำให้สีย้อมชอบที่จะอยู่ติดที่ผิวเส้นใยมากกว่าที่จะอยู่ในอ่างย้อม
2. **การดูดซึมของสีย้อมเข้าสู่เส้นใย (Diffusion)** ในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสีย้อมเคลื่อนที่เข้ามาเกาะติดที่ผิวของเส้นใยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเส้นใยจะเริ่มดูดซับสีย้อม จึงทำให้ภายในเส้นใยมีความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น การที่สีย้อมจะแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในเส้นใยนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย เช่น เส้นใยที่ชอบน้ำ จะมีโครงสร้างภายในที่เป็นรู ซึ่งทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถแพร่เข้าสู่เส้นใยได้ง่าย แต่เส้นใยที่ไม่ชอบน้ำจะมีการดูดซึมน้ำต่ำ จึงต้องทำการเพิ่มพื้นที่รูพรุนของเส้นใยเพื่อในสีย้อมเคลื่อนตัวเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้ ซึ่งในกระบวนการย้อมการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการช่วยเร่งให้โมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนตัวเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยได้เร็วขึ้น

3. ความคงทนของสีบนเส้นใย (Retention) เมื่อโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนภายในเส้นใย จะเกิดการยึดติดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยโดยอาศัยกลไกทางเคมีและทางกายภาพ การที่สีย้อมจะยึดติดในรูพรุนของเส้นใยได้ดีนั้น เกิดจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใยมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับตัวกลางในการย้อม ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการย้อมติดของสีบนเส้นใยจะต้องใช้แรงอย่างน้อย 2 ชนิด บางครั้งอาจมากถึง 4 ชนิด ซึ่งแรงที่ทำให้สีย้อมเกิดการยึดติดกับเส้นใยมีดังนี้

พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy group) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่น ได้แก่ พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ

แรงแวนเดอร์วาล์ล (Van der Waals'forces) แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแรงอย่างอ่อนๆ จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมและเส้นใยเกิดการยึดติดกันได้เอง ซึ่งการเกิดพันธะชนิดนี้จะมีสมบัติความคงทนของสีในเส้นใยไม่ค่อยดี เนื่องจากเป็นสีย้อมที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทำให้แพร่เข้าไปในรูพรุนของเส้นใยได้อย่างลำบาก

พันธะไอออนิก (Ionic bond) เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่มีประจุต่างกัน เช่น ในการย้อมเส้นใยโปรตีนด้วยสีแอสิด หรือการย้อมเส้นใยอะคริลิกด้วยสีเบสิค สีย้อมและเส้นใยที่เกิดพันธะชนิดนี้จะมีความคงทนของสีต่อการซักล้างดี เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะระหว่างสีย้อมกับเส้นใยและขนาดโมเลกุลของสีย้อมที่เกิดพันธะนี้จะมีขนาดเล็ก จึงมีการดูดกลืนแสงในช่วงที่แคบ ดังนั้นสีย้อมจึงมีเฉดสีที่สว่าง

พันธะโควาเลนท์ (Covalent bond) พันธะชนิดนี้จะเกิดขั้นหลังจากที่สีย้อมถูกดูดแนบกับเส้นใยแล้ว เช่นในกรณีของสีรีแอคทีฟสามารถยึดติดกับเส้นใยได้โดยพันธะโคเวเลนท์ ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้สีย้อมที่เกิดพันธะชนิดนี้มีความคงทนต่อการซักล้างดี

ในงานวิจัยนี้คาดว่าพันธะที่เกิดการยึดติดระหว่างสีย้อมกับเส้นใยไหม คือ พันธะไอออนิก เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้สีแอสิดในการย้อมสีเส้นใยไหม ซึ่งสีแอสิดจะประกอบด้วยหมู่ที่เป็นกรด เช่น $-SO_3Na$ ซึ่งจะสร้างประจุของสีย้อมเป็นลบในตัวกลางในการย้อม จะทำปฏิกิริยากับหมู่ที่เป็นเบสบนเส้นใย เช่น $-NH_2$ ซึ่งจะแสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในกระบวนการย้อม[10] ดังนั้นจึงทำให้การยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยมีความแข็งแรง

2.4 ความคงทนของสี (Color Fastness)

ความคงทนของสีย้อม เป็นค่าที่แสดงให้ทราบถึงระดับคุณภาพของสีย้อมที่แพร่เข้าไปยึดติดในรูพรุนในโครงสร้างของเส้นใยสิ่งทอ ซึ่งค่าความคงทนของสีย้อมจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสีย้อม สมบัติของเส้นใยสิ่งทอ และวิธีการย้อม ซึ่งในการทดสอบหาค่าความคงทนของสีย้อมจะมี

การทดสอบอยู่หลายรายการ ซึ่งในเลือกใช้การทดสอบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของเส้นใยสิ่งทอนั้น โดยเส้นใยสิ่งทอที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ควรผ่านการทดสอบความคงทนของสีย้อมในเส้นใย เช่น ความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทนของสีต่อแสง และความคงทนของสีต่อเหงื่อเป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพและลักษณะของงานที่จะนำเส้นใยสิ่งทอที่ผ่านการย้อมสีไปใช้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคงทนของสีย้อมในเส้นใยสิ่งทอ มีดังนี้

1. โครงสร้างทางเคมีของเส้นใย ซึ่งเส้นใยแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างทางเคมีต่างกันจึงมีความสามารถในการรับสีย้อมได้แตกต่างกัน
2. โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
3. การเติมสารเติมแต่ง
4. วิธีการและเทคนิคในการย้อมสี

2.4.1 ความคงทนของสีต่อการซักล้าง (Color Fastness to Washing) [13-14]

ความคงทนของสีต่อการซักล้าง หมายถึงความสามารถของเส้นใยที่จะทนต่อกระบวนการซักล้าง ไหมที่ผ่านกระบวนการย้อมสี มักจะมีปัญหาที่สำคัญคือ เมื่อนำผลิตภัณฑ์จากไหมที่ผ่านการย้อมสีไปทำการซักล้าง จะเกิดปัญหาสีตกทำให้ผ้าไหมมีความซีดจาง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงกระบวนการย้อมสี เพื่อให้เส้นใยมีความคงทนต่อการซักล้างเพิ่มขึ้น ปัญหาสีตกของไหมอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น การลอกกาวออกจากไหมออกไม่หมด การใช้สีย้อมที่มีราคาถูกและมีสมบัติของสีไม่ดี ใช้วิธีการย้อมที่ไม่เหมาะสม อุณหภูมิในการย้อมไม่สม่ำเสมอ และน้ำที่ใช้ในกระบวนการย้อมมีความกระด้าง มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง มีหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ISO 105 C01-C03 C06 Test A-C C10 มาตรฐานBS EN 20105 C01 C02 C03 C06 Test A-C มาตรฐานBS EN ISO 105 C01-C03 C06 Test A-C มาตรฐานBS 1006 C06 Test A-C มาตรฐานAATCC 61 (1A 2A) มาตรฐาน JIS L 0844 Test A1-A3 B1 C1-C3 C5 และ มอก.121 เล่ม 3

2.4.2 ความคงทนของสีต่อแสง (Color Fastness to Light) [15-16]

ความคงทนของสีต่อแสง หมายถึงความสามารถของเส้นใยสิ่งทอที่จะทนต่อแสงแดด รังสีที่อยู่ในแสงแดดเป็นตัวการที่สำคัญที่จะทำให้สีย้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ความคงทนของสีต่อแสงเป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของสีย้อม ซึ่งขึ้นกับความเข้มของแสงแดด และสมบัติของสีที่ใช้ย้อมเส้นใย โดยเฉพาะในประเทศที่มีอากาศร้อน เช่นประเทศไทย ค่าความคงทนของสีต่อแสงจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีโอกาสสูงที่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากเส้นใยสิ่งทอจะถูกแสงแดดแรงๆ และเป็นเวลานานในระหว่างการใช้งาน ซึ่งในกระบวนการย้อมสีเส้นใย หากผู้ย้อมเลือกใช้สีย้อมที่ไม่เหมาะสมกับเส้นใยและวิธีการย้อม ก็อาจจะทำให้สีของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือซีดจางก่อนหมดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นต่อไปได้ ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมก็จะส่งผลต่อค่าความคงทนของสีย้อมด้วย แสงจะทำให้สีย้อมทุกชนิดเกิด

การเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสงสามารถกระตุ้นให้สีย้อมทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่อยู่ใกล้เคียงจนทำให้สีย้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่สามารถพบได้มากที่สุดคือ เกิดการซีดจางของสี การเปลี่ยนเฉดสีของสีย้อม สีย้อมมีความสดใสลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
2. ภาวะแวดล้อม
3. สูตรโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเส้นใย
4. ความยาวคลื่นของแสงที่มาตกกระทบ
5. ปริมาณของสีย้อมที่อยู่ภายในเส้นใย
6. ปริมาณสารอื่นๆ ภายในเส้นใย

มาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงมีหลายมาตรฐาน เช่นมาตรฐานของ AATCC ISO JIS และ มอก. ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ซึ่งในแต่ละมาตรฐานจะถูกออกแบบให้ได้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากธรรมชาติและจะต้องให้ได้ผลการทดสอบที่สม่ำเสมอด้วย

2.4.3 ความคงทนของสีต่อเหงื่อ (Color Fastness to Perspiration)

เหงื่อสามารถทำให้สีของเส้นใยสิ่งทอเกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจทำให้เกิดการตกติดสีบนวัสดุอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นสิ่งทอที่จะนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อด้วย และมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อจะทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 :1994 ตามมาตรฐาน BS EN ISO 105-E04-1996 และ มอก.121 เล่ม 4

2.5 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid)

ของไหลเหนือวิกฤตเป็นสารบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิและความดัน สูงกว่าจุดวิกฤตของสารนั้น นอกจากนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้สมบัติของสารนั้นเปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนั้นของไหลเหนือวิกฤตจึงเหมาะสมที่จะนำไปเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในอุตสาหกรรม ซึ่งของไหลเหนือวิกฤตที่นิยมนำมาใช้ส่วนใหญ่ คือคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะเหนือวิกฤต

2.5.1 สมบัติของของไหลเหนือวิกฤต

โดยทั่วไปแล้วของไหลเหนือวิกฤตจะมีสมบัติที่อยู่ระหว่างสถานะแก๊สและของเหลว แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆ ของของเหลว แก๊สและของไหลเหนือวิกฤต

สถานะ	ความหนาแน่น (Kg/m^3)	ความหนืด (μPa.s)	การแพร่ (mm^2/s)
แก๊ส	1	10	1 – 10
ของไหลเหนือวิกฤต	100 – 1000	50 -100	0.01 – 0.1
ของเหลว	1000	500 – 1000	0.001

สมบัติที่สำคัญของของไหลเหนือวิกฤตอีกหนึ่งอย่างคือ เมื่ออุณหภูมิคงที่ ค่าการละลายของของไหลเหนือวิกฤตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของของไหลเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการละลายจึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นด้วย

2.5.2 ประโยชน์ของของไหลเหนือวิกฤต

ของไหลเหนือวิกฤตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายๆ อย่างเช่น

1. การสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต ข้อดีของการสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤตเมื่อเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยของเหลว คือของไหลเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำและมีความสามารถในการแพร่สูง โดยในกระบวนการการสกัดจะสามารถควบคุมความหนาแน่นของของไหลได้ และยังสามารถนำของไหลเหนือวิกฤตกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการลดความดันในการสกัด เนื่องจากการลดความดันจะทำให้ของไหลเหนือวิกฤตเปลี่ยนกลับไปอยู่ในสถานะแก๊ส โดยตัวอย่างที่ใช้ของไหลเหนือวิกฤตในการสกัด เช่น การสกัดคาเฟอีนจากเมล็ดกาแฟสีเขียว การผลิตน้ำมันหอมระเหยและผลิตภัณฑ์ยาจากพืช

2. การใช้ของไหลเหนือเหนือวิกฤตในกระบวนการทำความสะอาด

2.5.3 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ($SC\text{-}CO_2$)

ดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่า ของไหลเหนือวิกฤตที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือ $SC\text{-}CO_2$ ซึ่ง $SC\text{-}CO_2$ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดวิกฤต และจะมีสมบัติอยู่ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแก๊สและสถานะของเหลว โดย $SC\text{-}CO_2$ จะมีอุณหภูมิวิกฤต (T_C) 32 °C และความดันวิกฤต (P_C) 7.38 MPa สมบัติของของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะต่างๆสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะต่างๆ [6]

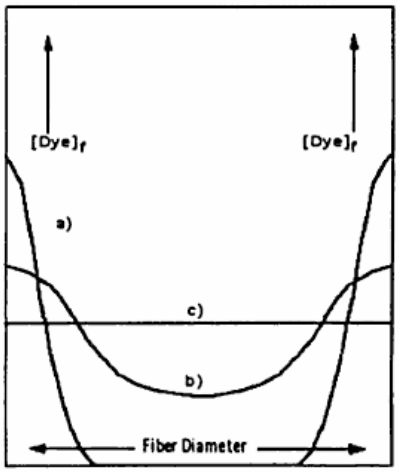
	แก๊ส	ของไหลวิกฤต	ของเหลว
อุณหภูมิ (^{O}C)	15 – 30	$T_C = 32$	15 – 30
ความดัน (MPa)	0.1	P = 28.0	0.1
ความหนาแน่น (g / cm^3)	0.0006 - 0.002	0.4 - 0.9	0.6 - 1.6
ความหนืด (μ Pa.s)	10 – 30	30 – 90	200 - 3000
สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2 / s)	0.001 - 0.004	0.002	$(0.2\text{-}2) \times 10^{-7}$

จากตารางที่ 2.6 พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะไหลเหนือวิกฤตมีสมบัติใกล้เคียงกับสถานะแก๊สและสถานะของเหลว เช่นมีความหนาแน่นที่สูงใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของเหลว จึงทำให้มีความสามารถในการละลายสูง และมีความหนืดต่ำใกล้เคียงกับสถานะแก๊ส จึงทำให้มีความสามารถในการแพร่หรือการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วในลักษณะของแก๊สทั่วไป

2.6 การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหม (Diffusivity of simple dye in silk yarn system) [17-18]

กระบวนการย้อมสีเส้นใยมี ขั้นตอนหลักๆ คือ โมเลกุลของสีย้อมที่ละลายอยู่ในตัวกลางแพร่ไปที่ผิวของเส้นใย และสีย้อมที่อยู่ติดกับผิวของเส้นใยเริ่มแพร่เข้าสู่ภายในเส้นใย หลังจากนั้นสีย้อมจะแพร่กระจายจากภายในของผิวเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยและเกิดการย้อมติดของสีย้อมกับเส้นใย ซึ่งกระบวนการย้อมสีของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใย (D) โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ในกระบวนการย้อมจะสิ้นสุดเมื่อสีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนและยึดติดกับเส้นใย โดยรูปที่ 2.3 แสดงความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยแทนด้วย $[Dye]_f$ เมื่อ [Dye] คือความเข้มข้นของสีย้อม และ f คือเส้นใย



รูปที่ 2.3 การแพร่กระจายของสีย้อมในเส้นใย ที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ [19]

จากรูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของสีย้อมในเส้นใย ที่เวลาในกระบวนการย้อมต่างๆ โดยกราฟ a เป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการย้อมสีเส้นใย ดังนั้นความเข้มข้นของสีย้อมที่ผิวของเส้นใยจะมีค่าสูงกว่าตรงกลางเส้นใย เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการย้อมจึงทำให้สีย้อมแพร่เข้าไปในใจกลางของเส้นใยได้ในปริมาณน้อย และเมื่อเวลาในกระบวนการย้อมเพิ่มขึ้น แสดงดังกราฟ b สีย้อมแพร่เข้าสู่รูพรุนของเส้นใยอย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นภายในรูพรุนมีค่าสูงขึ้น และเมื่อกระบวนการย้อมถึงจุดสมดุล ดังแสดงในกราฟ c สีย้อมจะกระจายตัวตลอดทั่วทั้งเส้นใยจึงทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากันทั้งเส้นใย

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยไหมที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius-type equation) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \tag{2.1}$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

D_0 คือ pre-exponential factor (m^2/s)

E_D คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (kJ/mol.K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

จากสมการที่ 2.1 พบว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_D) เป็นพลังงานที่ทำให้โมเลกุลของแก๊สและสีย้อมเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งใหม่ ดังนั้นจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยค่าคงที่ E_D และ D_0 สามารถหาได้จากการจัดรูปสมการที่ 2.1 ได้ดังสมการที่ 2.2

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_D}{RT} \tag{2.2}$$

จากสมการที่ 2.2 เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง ln D กับ 1/T มาพล็อตกราฟ จะได้ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง และนำสมการเส้นตรงของกราฟนี้ ไปหาค่า E_D/R จากความชันของกราฟ และค่าคงที่ D_0 จากจุดตัดแกน y

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยไหมจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของเส้นใย ดังนั้นจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเพื่อใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยทิศทางของการแพร่จะเกิดในแนวรัศมีเท่านั้น โดยมีขอบเขตการแพร่ดังนี้

$$C(t,r) = C_0 \, , \, t = 0 \, , \, r = r_0$$
$$C(t,r) = C_t \, , \, t > 0 \, , \, 0 < r < r_0$$

สามารถอธิบายขอบเขตการแพร่ของสีย้อมในเส้นใยได้ดังนี้คือ ที่เวลาเริ่มต้น และรัศมีที่บริเวณผิวของเส้นใยจะมีความเข้มข้นของสีย้อมที่แพร่เข้าสู่เส้นใยมีค่าเท่ากับความเข้มข้น C_0 และเมื่อถึงเวลาใดๆ สีย้อมที่แพร่เข้าสู่เส้นใยที่รัศมีที่มากกว่าศูนย์ ความเข้มข้นของสีย้อมที่แพร่เข้าสู่เส้นใยที่เวลาใดๆ จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้น C_t ดังนั้นจึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่แพร่ที่เวลาใดๆได้ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial c}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{D}{r}\frac{\partial c}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(rD\frac{\partial c}{\partial z}\right)\right] \tag{2.3}$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye}/g_{Silk})

t คือ เวลาในการย้อมสี (s)

r คือ รัศมีของเส้นใย (mm)

Z คือ แนวแกนตามความยาวของเส้นใย

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

แต่เนื่องจากเส้นใยมีความยาวอย่างต่อเนื่องและมีความยาวมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ในการทดลองจึงได้ม้วนเส้นใยให้มีขนาดพอดีกับเครื่องปฏิกรณ์ก่อนที่จะบรรจุเส้นใยไหมลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าเกิดการแพร่ในแนวแกน Z และ θ น้อยมาก เมื่อเทียบกับการแพร่ในแนวแกน r ทำให้สามารถลดรูปสมการที่ 2.3 ได้ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial C}{\partial r} \right) \tag{2.4}$$

และสามารถนำสมการที่ 2.4 มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสีย้อมในเส้นใยโดยใช้สมการที่เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่เวลาใดๆ กับค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่สมดุล ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$M_t/M_\alpha = 1 - A\exp\left(-aDt/r^2\right) - B\exp\left(-bDt/r^2\right) - C\exp\left(-cDt/r^2\right) \tag{2.5}$$

เมื่อ M_t คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่เวลาใดๆ (g_{Dye}/g_{Silk})

M_α คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นไหมที่สมดุล (g_{Dye}/g_{Silk})

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

t คือ เวลา (s)

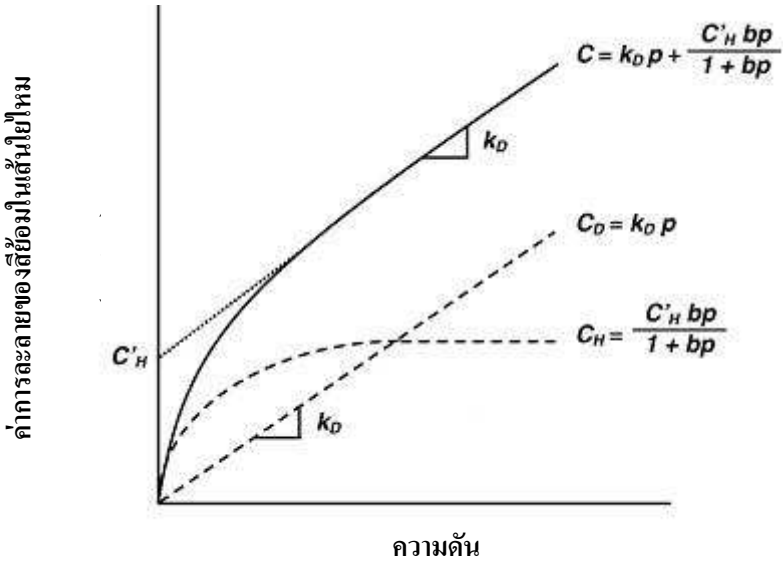
r คือ รัศมีของเส้นใย (mm)

A B C a b และ c คือค่าคงที่

2.7 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง [17,20]

แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทางได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซึมของสีย้อมในเส้นใยในกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยในกระบวนการนี้จะเกิดกลไกสองแบบคือ การละลายตามกฎของเฮนรี่ (Henry's law) และการดูดซึมตามกฎของแลงเมียร์ (Langmuir-type sorption) กล่าวคือ ในช่วงแรกที่ความดันของกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมต่ำการละลายที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสีย้อมที่ละลายในตัวกลางและเข้าไปย้อมติดในเส้นใยไหม ซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ โดยพบว่า การเพิ่มความดันในกระบวนการย้อมจะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการละลายสีย้อมได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วย และในช่วงที่ความดันในกระบวนการย้อม

สูงจะเกิดการดูดซึมซึ่งเป็นไปตามกฎของแลงเมียร์ โดยการดูดซึมที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณรูพรุนในเส้นใยไหม ดังนั้นแม้ว่าจะเพิ่มความดันในกระบวนการทดลองแต่ปริมาณรูพรุนที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้ที่ความดันสูงค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหมเริ่มมีค่าคงที่ โดยแบบจำลองการดูดซึมแบบสองทางแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการดูดซึมแบบสองทาง

$$C = C_D + C_H = k_D p + \frac{C'_H bp}{1+bp} \tag{2.6}$$

เมื่อ C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye} / g_{Silk})

k_D คือ ค่าคงที่การละลายตามกฎของเฮนรี่ (g_{Dye} / g_{Silk}) (MPa)

b คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างร่วม (Hole affinity constant) (MPa^{-1})

p คือ ค่าความดัน (MPa)

C'_H คือ ค่าคงที่ของรูช่องว่างอิ่มตัว (Hole saturated constant) (g_{Dye} / g_{Silk})

C_D คือ ค่าการดูดซึมแบบปกติของสารที่สามารถแพร่กระจายได้ (g_{Dye} / g_{Silk})

C_H คือ ค่าการดูดซึมภายในรูช่องว่างขนาดเล็กมากๆ (Microvoid) (g_{Dye} / g_{Silk})

ที่ความดันในกระบวนการทดลองต่ำๆ คือเทอมของผลคูณระหว่าง b และ p มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง สามารถลดรูปสมการที่ 2.6ได้ดังสมการที่ 2.7

$$C = [k_D + C'_H]P \tag{2.7}$$

และที่ความดันที่สูงมากๆ เนื่องจากปริมาณรูพรุนของเส้นใยมีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้ไม่สามารถดูดซึมสีย้อมได้อีก ดังนั้นเทอมของผลคูณระหว่าง b และ p มีค่ามากกว่าหนึ่ง จึงสามารถลดรูปสมการที่ 2.6 ได้ดังสมการ

$$C = k_D p + C'_H \tag{2.8}$$

แต่เนื่องจากกระบวนการย้อมสีเส้นใยไหมจะทำที่ช่วงความดันสูงกว่าความดันเหนือวิกฤตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในการประมาณค่าเชิงเส้นตรงของเส้นกราฟจะต้องทำที่ช่วงความดันเข้าใกล้จุดกำเนิดของเส้นกราฟ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ในสมการ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมการกลไกการดูดซึมแบบสองทางในสมการที่ 2.6 ได้ดังสมการ

$$C = C_D + C_H = k_D\left(P\text{-}P_C\right) + \frac{C'_H b\left(P\text{-}P_C\right)}{1 + b\left(P\text{-}P_C\right)} \tag{2.9}$$

2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก (Dye Partition Coefficient, *K*) [21]

เนื่องจากกลไกการดูดซึมที่เกิดขึ้นในกระบวนการการย้อมสีเส้นใยจะเกิดการดูดซึมสองกลไก คือกลไกแรกจะเกิดการดูดซึมระหว่างสีย้อมกับ SC-CO_2 และกลไกที่สองคือ การย้อมติดหรือการแพร่ของสีย้อมเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยโดยมี SC-CO_2 เป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของสีย้อมหรือเส้นใย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.10

$$K = \frac{C}{X} \tag{2.10}$$

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก

C คือ ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยไหม (g_{Dye}/g_{Silk})

X คือ ค่าการละลายของสีย้อมในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (g_{Dye}/g_{CO_2})

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัชรีพร แสงวัชรพันธุ์ [22] ได้ทำการศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วย SC-CO_2 โดยใช้สีย้อม C.I. Disperse Red 1 ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิช่วง 50 - 70 °C และความดันในช่วง 10 - 20 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนภาวะในกระบวนการย้อมที่ความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น เส้นใยมีลักษณะการติดของสีแดงที่เข้มมากกว่าเส้นใยที่ผ่าน

การย้อมที่ภาวะความดันและอุณหภูมิต่ำ จึงให้ค่าการละลายของสีย้อมในเส้นใยมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันระหว่างกระบวนการย้อมจะทำให้ความหนาแน่นของ CO_2 มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น CO_2 จึงทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายที่ดีในการพาเอาสีย้อมแพร่เข้าไปละลาย หรือย้อมติดในเส้นใยพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น และยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในการทดลองนี้ที่อุณหภูมิ 50-70 °C มีค่าเท่ากับ 1.88×10^{-14} 1.95×10^{-14} และ 2.42×10^{-14} m^2/s ตามลำดับ

Pier Luigi Beltrame และคณะ[23] ได้ทำการศึกษาการย้อมสีเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมชนิดดิสเพิร์สและสีย้อมธรรมชาติโดยใช้ SC-CO_2 เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อม และใช้ PEG ในการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนทำการย้อม ภาวะที่ใช้ในกระบวนการย้อมคือ อุณหภูมิ 98 °C ความดัน 200 - 250 bar เป็นเวลา 30 นาที พบว่า สารละลาย 8wt% PEG400 หรือ PEG600 ทำให้สีย้อมแพร่เข้าไปติดในเส้นใยได้ดีที่สุด และเมื่อนำไปทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง พบว่าจะมีความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในระดับต่ำเมื่อพิจารณาการปรับสภาพเส้นใยเซลลูโลสด้วย PEG ร่วมกับ benzamide พบว่าเมื่อนำเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย PEG ร่วมกับ benzamide มาสีย้อมสีโดยใช้ SC-CO_2 พบว่า จะทำให้ค่าความคงทนของสีต่อการซักล้างและค่าความคงทนของสีต่อแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

A. Schmidt และคณะ[24] ได้ศึกษากระบวนการย้อมเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ด้วยสีย้อม C.I. Disperse Yellow 23 ซึ่งถูกปรับปรุงด้วย 2-bromoacrylic acid และ 1,3,5-trichloro-2,4,6-triazine ด้วย SC-CO_2 ภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิ 120 - 160°C ความดัน 280 bar เป็นเวลา 30 - 240 นาที จากการศึกษาพบว่า SC-CO_2 สามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการย้อมสีเส้นใยได้ และยังพบว่าสีย้อมสามารถแพร่เข้าไปในเส้นใยไหมและขนสัตว์ได้ดีกว่าฝ้าย เมื่อนำเส้นใยที่ผ่านการย้อมไปทดสอบค่าความคงทนของสีต่อการขัดและความคงทนของสีต่อแสงพบว่าทั้งเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ จะมีค่าความคงทนของสีอยู่ระหว่าง 4 และ 5 โดยสีย้อม C.I. Disperse Yellow 23 ซึ่งถูกปรับปรุงด้วย 2-bromoacrylic acid จะให้ค่าความคงทนของสีได้ดีกว่า สีย้อม C.I. Disperse Yellow 23 ซึ่งถูกปรับปรุงด้วย 1,3,5-trichloro-2,4,6-triazine

อัญชุลี มานิตสกลุและคณะ[25] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการการลอกกาวในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดปัญหาเส้นไหมย้อมไม่สม่ำเสมอโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัย พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลอกกาว คืออุณหภูมิของน้ำ ระยะเวลาในการต้มและค่า pH ของน้ำ แล้วใช้หลักการการทดลองเพื่อหาพื้นผิวตอบสนอง เพื่อกำหนดค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ให้สมดุลกันคือ อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 86 °C เวลาในการต้ม 45 นาที

และค่า pH ของน้ำเท่ากับ 8.6 เมื่อทำการทดสอบภายใต้ภาวะดังกล่าวพบว่าเปอร์เซ็นต์การลอกกาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 22-23 เป็นร้อยละ 25-27 โดยน้ำหนัก และยังสามารถลดปัญญาเส้นไหมย้อมไม่สม่ำเสมอจากเดิมร้อยละ 57.2 เป็นร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก

ลลิดา บุญโฉม[26] ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและการย้อมติดสีของเส้นใยไหม โดยทำการศึกษาการลอกกาวด้วยสารเคมีหลายชนิดได้แก่ กรดทาร์ทาริก โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนตและไตรเอทิลเอมีน ในช่วงอุณหภูมิและช่วงเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าความสามารถในการลอกกาวของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นและเส้นใยไหมที่ผ่านการลอกกาวด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และได้ทำการศึกษากระบวนการต่อกิ่งไวนิลมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ เมทาคริลาไมด์และเมทิลเมทาไครเลท ที่อัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการต่อกิ่งไปศึกษาความสามารถในการย้อมติดสีโดยทำการเปรียบเทียบความสามารถในการย้อมของสี 2 ชนิด คือ สีแอสิดและสีเบสิก พบว่าเส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งเมทาคริลาไมด์มีปริมาณการเพิ่มของสีย้อมบนเส้นใยใกล้เคียงกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการต่อกิ่งแต่เส้นใยไหมที่ผ่านการต่อกิ่งจะมีความคงของสีสูงกว่า นอกจากนี้เส้นใยไหมก่อนและหลังการต่อกิ่งเมื่อนำไปย้อมด้วยสีแอสิดจะมีความคงทนของสีมากกว่าการย้อมด้วยสีเบสิก