เอกสารวิทยาเขตฯ
ห้ามนำออกจากห้องสมุด
ใช้เฉพาะ ชั้น 5 เท่านั้น

ผลของโลหะในน้ำต่อกระบวนการย้อม

Effects of Metal in Water on Cotton Dyeing Process

ชนิษฎา เธริญสาถ

RMUTK - CARIT
3 2000 00095513 0

สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
กันยายน 2550
(งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2550)

ACM
667.26
ช153ผ

ผลของโลหะในน้ำต่อกระบวนการย้อม

Effects of Metal in Water on Cotton Dyeing Process

ขนิษฐา เจริญลาภ

RMUTK - CARIT
3 2000 00095513 0

สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
กันยายน 2550
(งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2550)

0946
15/11/53

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องผลของโลหะในน้ำต่อกระบวนการย้อม สำเร็จลุล่วงด้วยดีจนสมบูรณ์ โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากเงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ขอขอบพระคุณอาจารย์จิราภรณ์ สัพทานนท์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.งามทิพย์ วิมลเกษม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราโมทย์ อนันตวราพงษ์ ที่ช่วยตรวจแก้ไขงาน และให้คำแนะนำตลอดจนนางสาวพรรนิภา แซ่อึ้ง นางสาวน้ำเพชร จิรนิล นายปฐมพงษ์ วงศ์ศรีสังข์ และนายณรงค์ชัย เชิงเร็ว นักศึกษาสาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่ได้มีส่วนร่วมเป็นผู้ช่วยในการดำเนินการวิจัย

ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสำเร็จของงานวิจัยนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโลหะในน้ำต่อกระบวนการย้อม ทดลองโดยย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ ในน้ำย้อมที่ที่มีปริมาณ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง แคลเซียม และแมกนีเซียม ในปริมาณต่าง ๆ กัน วัดระดับความเข้มสี และความแตกต่างของสีของผ้าย้อมด้วยเครื่องวัดสี ผลการทดลองพบว่า คุณภาพของการย้อม ขึ้นกับ ชนิด และปริมาณของโลหะในน้ำ โดยปริมาณโลหะในน้ำมากขึ้น ทำให้ระดับความเข้มสีบนผ้าลดลง สีย้อมที่ได้มีความหม่นและเฉดสีเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามปริมาณของโลหะ ผ้าที่ได้มีความคงทนต่อการซักต่ำ และนอกจากนี้ พบว่า โลหะมีผลต่อคุณภาพการย้อมแตกต่างกัน เมื่อย้อมด้วยสีที่มีเฉดต่างกัน โดยในการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ ปริมาณโลหะในน้ำที่เหมาะสมคือ แคลเซียมและแมกนีเซียมควรต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็ก แมงกานีส และทองแดง ควรต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

คำสำคัญ: โลหะไอออนในน้ำ, ระดับความเข้มของสี, ความแตกต่างของสี, สีรีแอคทีฟ

Abstract

The purpose of this research is to study effects of metal in water on cotton dyeing process. The experiment was conducted by dyeing knitting cotton with reactive dye in water with variables concentrated of Ca, Mg, Fe, Mn, and Cu. for six times. Then the knitting cotton was measured by reflectance spectrophotometer to find the color yield and change of the color shade. It was found that the dyeing quality depend on type and amount of metal ion in water. The higher metal ion can decrease the color yield on fabric with dullness, change of the color shade, and increase the color fastness. Moreover difference type of metals effect on difference color shade as well. The optimum stage for reactive dye is the amount of Ca and Mg less than 10 mg/l ; the amount of Fe, Mn and Cu less than 0.1 mg/l. It can be suggested that if the quality of water is well controlled ; the right shade of color can be yielded in the first time of the dyeing process.

Keyword : metal ion in water, color yield, color different, reactive dye

สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)		ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)		ค
บทที่ 1 บทนำ		1
1.1	ที่มาและความสำคัญของประเด็นปัญหาการวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
1.5	สมมติฐานการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง		4
2.1	ภาพรวมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ	3
2.2	การย้อมสี(dyeing process)	6
2.3	ระบบการวัดสี	10
2.4	คุณภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม	18
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน		27
3.1	วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทดลอง	27
3.2	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	31
3.3	สถานที่ทดลอง	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง		33
4.1	การศึกษาปริมาณโลหะในผ้าฝ้ายถัก	33
4.2	ผลของปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ	34
4.3	ผลของปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ	38

สารบัญ

		หน้า
4.4	ผลของปริมาณเหล็กในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ	42
4.5	ผลของปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ	46
4.6	ผลของปริมาณทองแดงในน้ำต่อกระบวนการฟอกผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง		54
5.1	ชนิดและปริมาณโลหะในผ้าฝ้ายถัก	54
5.2	ผลของโลหะในน้ำต่อคุณภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ	54
5.3	ปริมาณของโลหะในน้ำที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถัก	56
5.4	ตัวแปรอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพการย้อม	57
5.5	ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง		58
ภาคผนวก ก		60
ภาคผนวก ข		76
ภาคผนวก ค		92

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ประเภทของสีย้อมที่นิยมใช้กับเส้นใยประเภทต่างๆ	6
ตารางที่ 2.2	ไอออนประจุบวกและไอออนประจุลบที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ	20
ตารางที่ 2.3	ระดับความกระด้างของน้ำตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต	21
ตารางที่ 2.4	ผลของความกระด้างของน้ำต่อกระบวนการทางเคมีสิ่งทอ	23
ตารางที่ 2.5	คุณภาพน้ำใช้ในกระบวนการทางสิ่งทอ	24
ตารางที่ 3.1.1	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	27
ตารางที่ 4.1.1	ชนิดและปริมาณของโลหะในผ้าฝ้าย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	33
ตารางที่ 4.2.1	การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน	34
ตารางที่ 4.2.2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน	36
ตารางที่ 4.2.3	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสีหลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมในปริมาณแคลเซียมต่างกัน	37
ตารางที่ 4.3.1	การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน	38
ตารางที่ 4.3.2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน	40
ตารางที่ 4.3.3	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสีหลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน	41
ตารางที่ 4.4.1	การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน	42
ตารางที่ 4.4.2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน	44

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.4.3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสีหลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน	45
ตารางที่ 4.5.1	การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน	46
ตารารงที่ 4.5.2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน	48
ตารารงที่ 4.5.3	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสีหลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน	49
ตารางที่ 4.6.1	การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน	50
ตารางที่ 4.6.2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน	52
ตารางที่ 4.6.3	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสีหลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน	53

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ	5
รูปที่ 2.2	ลักษณะเฉดสี (hue), ความสว่างของสี (value) และความเข้มของสี (chroma)	11
รูปที่ 2.3	โครงสร้างสีของมันเซลล์	11
รูปที่ 2.4	ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุทึบแสง	14
รูปที่ 2.5	CIE 2° และ 10° standard observers	15
รูปที่ 2.6	ค่าไตรสทิมูลัส (tristimulus values)	15
รูปที่ 2.7	การบรรยายสีในระบบ CIE lab ในรูป 3 มิติ	16
รูปที่ 3.1	การเตรียมผ้าก่อนย้อม	32
รูปที่ 3.2	การเตรียมน้ำย้อม	32
รูปที่ 3.3	การย้อมผ้า	32
รูปที่ 4.2.1	ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแคลเซียมต่างๆ	35
รูปที่ 4.3.1	ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแมกนีเซียมต่างๆ	39
รูปที่ 4.4.1	ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณเหล็กต่างๆ	43
รูปที่ 4.5.1	ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแมงกานีสต่างๆ	47
รูปที่ 4.6.1	ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณทองแดงต่างๆ	51
รูปที่ 5.1	ปฏิกิริยาการเติม (addition reaction) ระหว่างกลุ่มไวนิลซัลโฟน ของสีรีแอคทีฟกับกลุ่มไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส	55
รูปที่ 5.2	ปฏิกิริยาการแทนที่ (substituitionition reaction) ระหว่างกลุ่ม โมโนคลอโนไตรเอซีนของสีรีแอคทีฟกับกลุ่มไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของประเด็นปัญหาการวิจัย

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญ มีมูลค่าการผลิต และการส่งออกสูง ทำรายได้ในระดับต้น ๆ ให้กับประเทศไทย(กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547: 6) เป็นอุตสาหกรรมที่มีระบบการผลิตอย่างต่อเนื่องจากต้นน้ำถึงปลายน้ำ ได้แก่ การผลิตเส้นใย(fiber production) การปั่นด้าย(spinning) การทอผ้าและถักผ้า(weaving and knitting) การเตรียมผ้า (preparation) การย้อมสีและพิมพ์ผ้า(dyeing and printing) การตกแต่งสำเร็จ(finishing) และการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป(garment)

จากภาพรวมของอุตสาหกรรมสิ่งทอที่เป็นระบบต่อเนื่องนี้ ปัญหาซึ่งเป็นคอขวดของอุตสาหกรรมทั้งระบบ คืออุตสาหกรรมฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสิ่งทอ(กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547: 9) เนื่องจากกระบวนการผลิตมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมากกับสิ่งแวดล้อม มีการใช้พลังงาน น้ำ สารเคมี เป็นวัตถุดิบส่วนหนึ่งของการผลิต และมีปัญหาจากการผลิตซ้ำ เนื่องจากคุณภาพการย้อมไม่สม่ำเสมอ และไม่ตรงตามมาตรฐาน ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น แนวทางในการป้องกันปัญหาดังกล่าว คือการควบคุมคุณภาพน้ำที่ใช้ในการผลิต ซึ่งต้องเป็นน้ำอ่อน ใส มีปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำ ปราศจากการปนเปื้อนของโลหะไอออนในน้ำ(N. Manivasakam, 1995: 13) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของโลหะไอออนในน้ำที่มีต่อกระบวนการย้อม เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพน้ำใช้ในกระบวนการย้อม ทำให้ย้อมสีได้ตรงตามความต้องได้ตั้งแต่ครั้งแรก (right first time) และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ในขณะที่ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

(1) ศึกษาชนิด และปริมาณโลหะในผ้าฝ้ายถัก

(2) ศึกษาผลของโลหะต่อประสิทธิภาพการย้อมสี(dyeing)

(3) ศึกษาปริมาณของโลหะที่เหมาะสมในน้ำสำหรับกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถัก

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

(1) ชนิดของโลหะ ได้แก่ แคลเซียม(Ca) แมกนีเซียม(Mg) ทองแดง(Cu) เหล็ก(Fe) และ แมงกานีส(Mn)

(2) ผลของโลหะ ต่อประสิทธิภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ(reactive dye) ทดสอบพารามิเตอร์ดังนี้

- ระดับความเข้มสีบนผ้า(K/S)
- ค่าความคงทนต่อการซัก
- ค่าความแตกต่างของสี

(3) ชนิดของสีย้อม

ใช้สีรีแอคทีฟ Sumifix HF จำนวน 3 เฉดสี ดังนี้

- Sumifix HF Blue 2R Gran
- Sumifix HF Red G Gran
- Sumifix HF Yellow 3R Gran

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้คุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

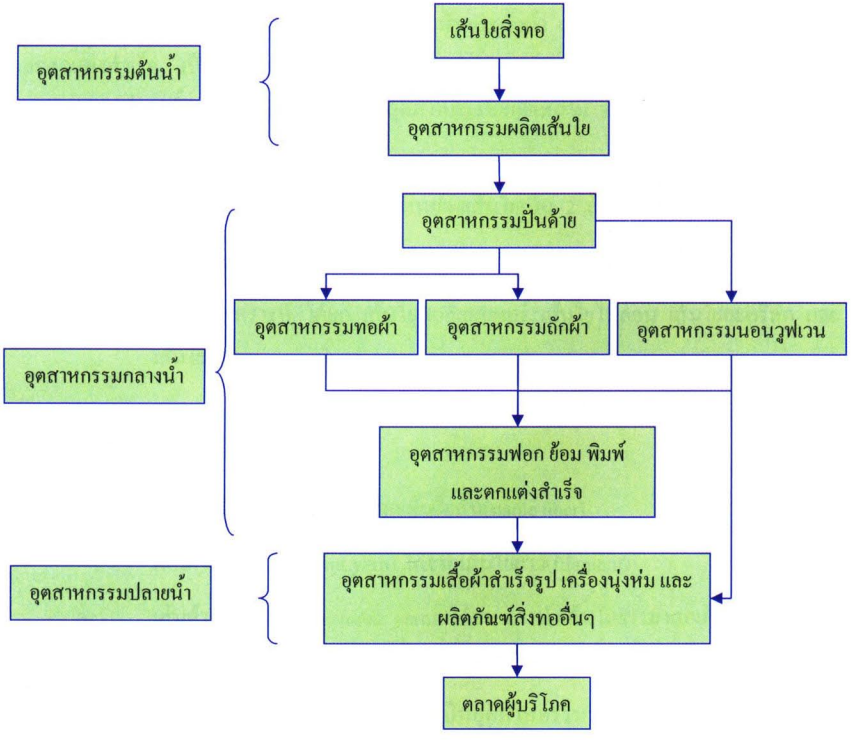
(2) ทำให้ย้อมสีได้ถูกต้องในครั้งแรก เกิดผลิตภัณฑ์ที่เสียน้อยลง เป็นการประหยัดต้นทุน ประหยัดพลังงาน ประหยัดน้ำ ประหยัดทรัพยากรในการผลิต

1.5 สมมติฐานการวิจัย

ปริมาณโลหะในน้ำมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการย้อมในทางตรงกันข้าม

(4) อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตผ้าก่อนออกสู่ผู้บริโภค หรือโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป โดยเพิ่มคุณค่าให้ผ้าผืนในด้านความสวยงาม น่าใช้ สวมใส่สบาย และเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในกิจกรรมต่าง ๆ เป็นอุตสาหกรรม ที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ได้อย่างมาก แต่มักมีปัญหาในส่วนของการบริหารจัดการน้ำ ทั้งในส่วนของน้ำใช้ และการปล่อยน้ำเสีย

(5) อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำของระบบโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม ได้แก่ เสื้อผ้าสำเร็จรูปจากการทอ และเสื้อผ้าสำเร็จรูปจากการถัก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ

ที่มา: กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547: 2.

บทที่ 2

เอกสารและรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอ หมายถึงกระบวนการเปลี่ยนเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยประดิษฐ์ หรือเส้นใยสังเคราะห์ ไปเป็นเส้นด้าย ผืนผ้า และเสื้อผ้าสำเร็จรูป เคหะสิ่งทอ ฯลฯ ประกอบด้วยอุตสาหกรรมย่อยหลายอุตสาหกรรมด้วยกัน คือ อุตสาหกรรมเส้นใย ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำ (upstream) อุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมทอผ้าและถักผ้า และอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำ(midstream) และอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำ(downstream) โดยทุกอุตสาหกรรมย่อยเหล่านี้ มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันทั้งระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

(1) อุตสาหกรรมเส้นใย แบ่งประเภทของเส้นใยเป็น 2 ลักษณะคือ

- เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม ลินิน ป่าน ปอ เป็นต้น
- เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยพอลิเอสเทอร์ เส้นใยไนลอน เส้นใยอะคริลิก และเส้นใยเรยอน

(2) อุตสาหกรรมปั่นด้าย เป็นอุตสาหกรรมที่นำเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์มาตีเกลียว หรือปั่นให้เป็นเส้นด้าย แบ่งเป็น

- เส้นด้ายปั่น(spun yarn) ได้จากเส้นใยสั้น(staple fiber)
- เส้นด้ายใยยาว(filament yarn) ได้จากเส้นใยยาว(filament)
- เส้นด้ายเทกซ์เจอร์(textured yarn) ได้จากการนำเส้นใยยาวมาตกแต่งสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่นให้มีความนุ่มนวล น่าสัมผัส และดูดซับน้ำดีขึ้น

(3) อุตสาหกรรมทอผ้าและถักผ้า เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปั่นด้าย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมทอผ้า และถักผ้า ได้แก่

- ผ้าทอ ประกอบด้วยผ้าทอจากใยฝ้าย ใยสังเคราะห์ และใยผสม
- ผ้าถัก ประกอบด้วยผ้าถักจากใยฝ้าย ใยสังเคราะห์ และใยผสม

2.2 การย้อมสี (dyeing process)

การให้สีวัสดุสิ่งทอในระบบอุตสาหกรรม ทำได้ 2 วิธี คือ การย้อม และการพิมพ์ หลักการย้อมคือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลาย หรือกระจายอยู่ในสารละลาย (dispersion) ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุ(substrates) ที่จะย้อม เช่น เส้นใย เส้นด้าย ผ้า และเสื้อผ้า การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในอย่างสม่ำเสมอ จุดประสงค์หลักของการย้อมคือ ได้สีสม่ำเสมอ มีความคงทนทั้งการใช้งาน และกระบวนการผลิตขั้นต่อมา ส่วนการพิมพ์คือ การทำให้เกิดสีเป็นลวดลายตามที่ต้องการ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการย้อมเฉพาะแห่ง

กระบวนการย้อมสีในเชิงพาณิชย์ ใช้วิธีการนำสีย้อมมาทำเป็นสารละลาย หรือตัวทำกระจาย นำมาย้อมกับเส้นใยที่ต้องการย้อม แล้วตามด้วยกระบวนการทำให้สีย้อมติดแน่นกับเส้นใยตลอด ไม่ว่าจะเป็นการชำระล้างจากของเหลวชนิดใด การย้อมสีควรให้เกิดความคงทนของสีย้อมต่อภาวะต่าง ๆ ดังนี้ คือ การซักรีด แสง การขัดถู สารฟอกสี และเหงื่อ

ความคงทนของสีย้อมขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ในการย้อม เช่น ชนิดของสีย้อม กระบวนการย้อม การเตรียมน้ำย้อม และภาวะการย้อม

2.2.1 สีย้อม(dyestuff) (K. Hunger, 2003.)

สีย้อมชนิดต่าง ๆ มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และมีวิธีการที่ต่างกันในการนำไปย้อมกับเส้นใยชนิดต่าง ๆ ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของสีย้อมที่นิยมใช้กับเส้นใยประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 ประเภทของสีย้อมที่นิยมใช้กับเส้นใยประเภทต่าง ๆ

ประเภทของสีย้อม	ประเภทของเส้นใย
สีแอสิด (acid)	ไนลอน ขนสัตว์ ไหม
สีอะโซอิก (azoic)	ฝ้าย เรยอน เซลลูโลสอะซิเทต พอลิเอสเทอร์
สีเบสิก (basic)	พอลิอะคริโลไนไทรล์ โมดิฟายไนลอน พอลิเอสเทอร์
สีไดเร็กท์ (direct)	ฝ้าย เรยอน ไนลอน
สีดิสเพอร์ส (disperse)	พอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ อะซิเทต อะคริลิก
สีรีแอคทีฟ (reactive)	ฝ้าย ขนสัตว์ ไหม ไนลอน
สีซัลเฟอร์ (sulphur)	ฝ้าย เรยอน
สีแวต (vat)	ฝ้าย เรยอน ขนสัตว์

ที่มา: K. Hunger., 2003: 4.

(1) สีไดเร็กท์(direct dye)

สีไดเร็กท์ คือสีย้อมที่ละลายน้ำได้และมีประจุลบ สามารถย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดี เช่น ฝ้าย(cotton) วิสโคส เรยอน(viscose rayon) คิวพราโมเนียม เรยอน(cupramonium rayon)

สีไดเร็กท์เป็นสีที่ใช้ง่าย ราคาถูก ระดับสีกว้าง มีสมบัติความคงทนต่าง ๆ ต่ำ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีประเภทนี้กับเส้นใยเป็นพันธะอ่อน ๆ เช่นพันธะไฮโดรเจน พันธะวันเดอร์วาลล์ ซึ่งปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนด้วยการย้อมทับ(aftertreatment of direct dye) หรือตกแต่งให้คงทนต่อการยับด้วยเรซิน ซึ่งจะช่วยทำให้สีคงทนยิ่งขึ้น การย้อมสีประเภทนี้ต้องอาศัยเกลือ (electrolyte) เพื่อทำให้ประจุภายในเส้นใยลดลง หรือหายไป ช่วยเร่งการดูดซึมของสี โดยสีไดเร็กท์มีการดูดซึมสีได้ดีที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ขึ้นกับโครงสร้างสี

(2) สีซัลเฟอร์(sulphur dyes)

สีซัลเฟอร์เป็นสีย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยเฉพาะย้อมผ้าฝ้ายให้ความคงทนต่อภาวะต่าง ๆ ได้ดี มีขอบเขตของสีค่อนข้างจำกัด ส่วนใหญ่เป็นสีทึบ ด้านไม่ค่อยสดใส ในโมเลกุลของสีจะมีพันธะที่เชื่อมระหว่าง ซัลเฟอร์ 2 อะตอม(sulphur linkage) ปกติไม่ละลายน้ำ หรือละลายบ้างเล็กน้อย แต่จะละลายในสารละลายของสารรีดิวซ์ เช่นโซเดียมซัลไฟต์(sodium sulphite) ซึ่งจะรีดิวซ์โมเลกุลสี ให้แตกออกตรงตำแหน่งที่เชื่อมระหว่างซัลเฟอร์ 2 อะตอม เกิดเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ ที่ละลายน้ำ และสามารถยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลส

(3) สีแวต(vat dye)

สีแวต มีสมบัติเฉพาะตัวคือ ไม่ละลายน้ำ และมีระดับสีเกือบทุกเฉดสี(shade) ในการย้อมสีแวต ขั้นแรกต้องทำให้สีอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ โดยการรีดิวซ์สีแวตด้วยโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในสารละลายด่างแก่ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์(sodium hydroxide) ในสภาพนี้สีแวตจะมีลักษณะเป็นสารประกอบลิวโค(leuco) ซึ่งละลายน้ำได้ และมีความสามารถในการยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลส หลังจากนั้นทำการออกซิไดส์ เพื่อให้สีแวตเปลี่ยนกลับสู่สภาพที่ไม่ละลายน้ำ

(3) สีรีแอคทีฟ(reactive dye)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่มีประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยสีจะทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกไซด์(-OH) ของเส้นใยเซลลูโลส ในน้ำย้อมที่ภาวะต่าง เกิดพันธะเคมีแบบโควาเลนต์ระหว่างสีรีแอคทีฟกับเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ให้เฉดสีที่มีความสดใส มีความสม่ำเสมอดี และมีความคงทนต่อการซักดี

ในปัจจุบันการย้อมเซลลูโลสด้วยสีรีแอคทีฟกำลังได้รับความนิยมสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเป็นสีย้อมที่สามารถย้อมได้เกือบทุกเฉด สีที่ได้มีความสดใส แต่การย้อมสีรีแอคทีฟต้องควบคุมการย้อมอย่างใกล้ชิด เพราะอาจทำให้ผลการย้อมไม่เป็นไปตามต้องการ

โครงสร้างพื้นฐานของสีรีแอคทีฟประกอบด้วยสามส่วนดังนี้

- ส่วนที่มีสี(chromophore) แทนด้วยตัวอักษร D มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับโมเลกุลของสีย้อมโดยทั่วไป ส่วนใหญ่เป็นพวกสีอะโซ(azo) แอนทราควิโนน (anthraquinone) และพธาโลไซยามีน(phthalocyamine)
- กลุ่มทำปฏิกิริยา(reactive group) แทนด้วยตัวอักษร R แบ่งออกได้อีก 3 ส่วนคือ

  ส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมกับส่วนที่มีสี แทนด้วยตัวอักษร X

  ส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของกลุ่มทำปฏิกิริยา แทนด้วยตัวอักษร C โดยมีโครงสร้างทางเคมีหลัก คือโครงสร้างที่อะตอมเรียงตัวกันเป็นแนวตรง(aliphatic chain) และโครงสร้างที่อะตอมเรียงตัวเป็นวง(heterocyclic ring)
- ส่วนที่เป็นกลุ่มที่จะหลุดออกไป(leaving group) แทนด้วยอักษร L

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสีกลุ่ม X กลุ่ม C และกลุ่ม L ทำให้ได้สีรีแอคทีฟที่มีสมบัติแตกต่างกันไปได้มากมาย

การย้อมสีรีแอคทีฟ ใช้อุณหภูมิในช่วง 40 – 70 องศาเซลเซียส ขึ้นกับประเภทของสี(สีย้อมเย็น หรือย้อมร้อน) ในขณะย้อมต้องใช้สารช่วย เกลือและด่าง ในปริมาณที่เหมาะสม

(4) สีแอสิด(acid dye)

สีแอสิดเป็นสีประจุลบ(anionic dye) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม และเส้นใยพอลิเอไมด์ เช่นไนล่อน ในภาวะที่เป็นกรด โดยใช้กรดซัลฟิวริก กรดฟอร์มิก กรดแอซิติก หรือแอมโมเนียมซัลเฟต ค่าพีเอชของน้ำย้อมอยู่ระหว่าง 2 – 7 ขึ้นกับชนิดของเส้นใยที่ใช้ย้อม ความเข้มของสีที่ต้องการ และชนิดของกรดที่ใช้ ให้เฉดสีที่สดใส ถ้าเลือกสีที่เหมาะสมจะได้สีที่มีความคงทนต่อแสงดีมาก สมบัติด้านความคงทนตลอดจนความสม่ำเสมอของสีแต่ละตัวขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของสี

(5) สีเบสิค(basic dye)

สีเบสิคเป็นสีประจุบวก(cationic dye) ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก สีถูกดูดซึม และยึดติดกับสายโซ่พอลิเมอร์ได้เร็วมาก จนทำให้การย้อมไม่สม่ำเสมอ จึงต้องมีการเติมสารชะลอการติดสี(retarder) เพื่อช่วยชะลออัตราเร็วในการแพร่ของสีเข้าสู่เส้นใย และในการยึดติดของสีกับสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใย

(6) สีดิสเพอร์ส(disperse dye)

สีดิสเพอร์สเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติละลายน้ำได้ต่ำ ต้องใช้สารเคมีช่วยย้อมที่ช่วยให้สีกระจายตัวในน้ำย้อม(dispersing agent) ใช้ย้อมเส้นใยไนล่อน และพอลิเอสเทอร์

2.2.2 วิธีการย้อม(dyeing process)

การย้อมวัสดุสิ่งทอมีหลายวิธี ทั้งแบบต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง การย้อมผ้า และเส้นด้ายแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้ 3 วิธีดังนี้

(1) การย้อมแบบดูดซึม(exhaustion method)

การย้อมแบบดูดซึม ผ้าหรือวัสดุที่ย้อมจะถูกแช่ หรือหมุนอยู่ในอ่างย้อม จนกระทั่งการย้อมเสร็จสมบูรณ์(batchwise process) เครื่องย้อมที่นิยมใช้มาก เช่น เครื่องจิกเกอร์ เครื่องวินซ์ เครื่องเจ็ต เครื่องย้อมด้ายสำเร็จรูป เครื่องย้อมแต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักผ้าต่อสารละลายน้ำย้อม (liquor ratio, L: R) แตกต่างกัน เช่น เครื่องย้อมจิกเกอร์มี L: R เท่ากับ 1: 2 – 1: 5 เครื่องย้อมเจ็ต L: R เท่ากับ 1: 8 – 1: 12 เครื่องย้อมวินซ์ L: R เท่ากับ 1: 5 – 1: 30 เครื่องย้อมด้ายสำเร็จรูป L: R เท่ากับ 1: 10 – 1: 30

(2) การย้อมแบบวิธีกึ่งต่อเนื่อง(semi-continuous method)

การย้อมแบบวิธีกึ่งต่อเนื่อง หรือเรียกอีกอย่างว่า pad - batch dyeing ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

การอัดน้ำสีและด่าง ⟶ การม้วนเก็บ ⟶ การซัก

เครื่องย้อมที่ใช้ประกอบด้วย อ่างน้ำย้อมสำหรับจุ่มผ้า ลูกกลิ้งสำหรับการอัดรีดเอาน้ำย้อมส่วนเกินออกจากผ้า ลูกกลิ้งสำหรับม้วนเก็บผ้า และอ่างซัก

(3) การย้อมด้วยวิธีต่อเนื่อง(continuous method)

การย้อมด้วยวิธีต่อเนื่อง ผ้าจะเคลื่อนไปตามขั้นตอนการย้อมต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหยุดแช่อยู่ที่จุดใด ตั้งแต่เป็นผ้าขาว จนกระทั่งออกมาเป็นผ้าย้อมสำเร็จ เป็นวิธีการย้อมที่เร็วที่สุด เหมาะกับการย้อมทีละมาก ๆ

2.3 ระบบการวัดสี

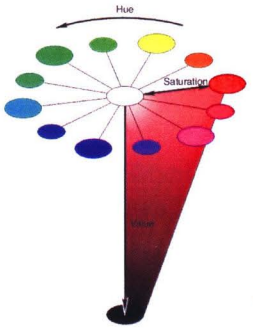
ผ้าที่ผ่านกระบวนการย้อมสี จะนำมาวัดค่าสี เพื่อบ่งบอกความแตกต่างของสีระหว่างชิ้นตัวอย่าง กับชิ้นมาตรฐาน ว่าแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ ทำให้สามารถควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์ได้ แต่เนื่องจาก การระบุลักษณะสีของวัตถุชิ้นเดียวกันที่มนุษย์มองเห็นนั้น มีความหลากหลายขึ้นกับประสบการณ์ เพศ อายุ อารมณ์ และสิ่งแวดล้อมในการมอง เป็นต้น ทำให้ไม่สามารถสื่อความหมายของสีให้เข้าใจตรงกันได้ และเกิดความผิดพลาดได้ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงมีการพัฒนาการจัดลำดับสี หรือการวัดสีให้สามารถสื่อความหมายให้เข้าใจได้ตรงกันในระดับสากล โดยระบบการวัดสีที่นิยมได้แก่

(1) ระบบสีมันเซลล์(Munsell)

ระบบมันเซลล์ พัฒนาขึ้นโดย Albert H. Munsell อาศัยสมบัติการมองเห็นสีสามประการ คือ เฉดสี(hue) ความสว่างของสี(value) และความบริสุทธิ์ของสี(chroma) (รูปที่ 2.2 – 2.3)

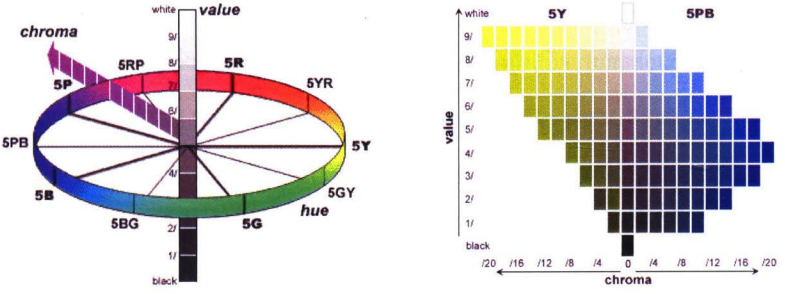
- เฉดสี(hue, h*) เป็นชื่อเรียกชนิดของสี ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวคลื่น หมายถึง ความรู้สึกที่ต่างกันของการเห็นสี เช่น สีแดง สีเหลือง สีน้ำเงิน เป็นต้น
- ค่าความสว่างของสี(value, L*) เป็นค่าที่ใช้บอกความมืด หรือความสว่างของสี กำหนดให้สีดำมีความสว่างระดับ 0 และสีขาวมีความสว่างระดับ 10 ส่วน 1 - 9 เป็นระดับความสว่างสีเทา
- ความเข้มของสี(chroma,C*) เป็นค่าที่บอกความอิ่มตัว(saturation) หรือความบริสุทธิ์ของสี(purity)

มันเซลล์จัดเรียงลักษณะสีบนแกน 3 มิติ โดยแกน x เรียงตามความสว่าง(value) แกน y เรียงตามความเข้ม(chroma) และแกน z เรียงตามเฉดสี(hue)



รูปที่ 2.2 ลักษณะเฉดสี(hue) ความสว่างของสี(value) และความเข้มของสี(chroma)

ที่มา: www.ncsu.edu/scivis/index.html



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีของมันเซลล์

ที่มา: http//personales.upv.es

จากภาพโครงสร้างสีของมันเซลล์

- แผ่นกระดาษสีจะถูกจัดเรียงตามลักษณะเฉดสีต่าง ๆ ของแถบสเปคตรัม ไปตามเส้นรอบวง 10 สี คือ สีแดง(red, R) สีแดงออกเหลือง(yellow - red, YR) สีเหลือง (yellow, Y) สีเหลืองออกเขียว(green - yellow, GY) สีเขียว(green, G) สีเขียวออกน้ำเงิน(blue - green, BG) สีน้ำเงิน(blue, B) สีน้ำเงินออกม่วง(purple - blue, PB) สีม่วง(purple, P) และสีม่วงออกแดง(red - purple, RP)

  แผ่นกระดาษสีกลุ่มที่มีเฉดสีเดียวกัน จะถูกจัดเรียงในแนวดิ่ง ตามค่าความสว่างของสี(value) ที่แตกต่างกันจากสีที่มีความสว่างต่ำสุดจนถึงสูงสุด

- แผ่นกระดาษสีที่มีเฉดสี และค่าความสว่าง เดียวกันจะถูกจัดเรียงในแนวนอนตามลักษณะของสีที่มีความเข้มหรือความบริสุทธิ์ของสีที่แตกต่างกัน จากสีที่มีความสดน้อยที่สุดจนถึงมากที่สุด

ระบบสีของมันเซลล์ ระบุสีของวัตถุโดยใช้ตัวเลข และตัวอักษรในลักษณะ เฉดสี - ความสว่างของสี/ความบริสุทธิ์ของสี(hue - value/chroma) โดยสีที่มีเฉดเดียวกันมีค่าตั้งแต่ 1 – 10 และต่อท้ายด้วยตัวอักษรย่อของสีคือ R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P ซึ่งเรียงลำดับไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับความสว่างของสีจะมีค่าตั้งแต่ 0 – 10 โดยสีที่มีความสว่างน้อย มีค่าต่ำ และจะต่ำลงไปจนถึงตำแหน่ง/0 ถ้าวัตถุนั้นมีสีดำ ส่วนสีที่มีความสว่างมาก หรือสีอ่อน มีค่าสูง และจะสูงไปจนถึงตำแหน่ง/10 ถ้าวัตถุนั้นมีสีขาว สำหรับความเข้มของสีจะมีค่าตั้งแต่ 0 – 12 หรือ 14 ขึ้นกับว่าแต่ละสีจะสดที่สุดได้เท่าไร

ดังนั้นถ้าสีในระบบมันเซลล์ ระบุว่า 5Y 8/10 หมายความว่า มีเฉดสี 5Y เป็นสีเหลือง มีค่าความสว่าง 8 เป็น สีเหลืองอ่อน มีค่าความบริสุทธิ์ของสี 10 แสดงถึงสีมีความสดค่อนข้างมาก

(2) ระบบ CIE L*a*b* (CIE lab scale) (Jr., F.W. Billmeyer and M. Saltzman.,1981)

ระบบ CIE พัฒนาขึ้นเมื่อปี คศ. 1931 เมื่อ Commission International de l'Eclairage(CIE) เห็นความจำเป็นของการพัฒนาระบบการวัดสี ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความคิดของมนุษย์ในการระบุสี โดยวัดสีออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งมีข้อดีดังนี้

- เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับความเห็นของบุคคล ทำให้ลดปัญหาความขัดแย้งลงได้
- เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลข ดังนั้นถึงแม้ชิ้นงานจะซีดตามกาลเวลา แต่จากตัวเลขที่มีอยู่ ทำให้ทราบได้ว่าสีเดิมเป็นอย่างไร
- เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณ และทำนายสูตรสีผสมได้

หลักการทำงานของเครื่องมือวัดสีตามมาตรฐานของระบบ CIE ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

(2.1) แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน(Illuminants)

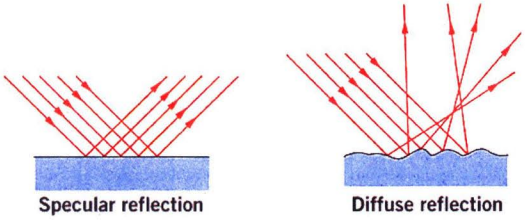
แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้วัดสี สามารถวัดการกระจายพลังงานที่แต่ละความยาวคลื่น(spectral power distribution, SPD) โดยใช้เครื่องวัดค่าการสะท้อนแสง เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสง มีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงถ้ามีแสงแตกต่างจากสีขาว เมื่อตกกระทบกับวัตถุจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับมาเกิดสีที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการตรวจสอบสีของตัวอย่างใน

อุตสาหกรรม จึงต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่มีคุณภาพของแสงคงที่ และเชื่อถือได้ และเพื่อให้การวัดสีมีมาตรฐาน CIE ได้กำหนดแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นมาตรฐานดังนี้

- Illuminant A มีการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่นใกล้เคียงกับหลอดทังสเตน หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มีอุณหภูมิของสี(color temperature) ประมาณ 2848 K
- Illuminant B มีการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่นใกล้เคียงกับหลอดทังสเตน หรือแหล่งกำเนิดแสง อื่นที่นำมาผ่านแผ่นกรองแสง มีอุณหภูมิของสีประมาณ 4900 K ใช้แทนแสงแดดตอนเที่ยง
- Illuminant C มีการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่นใกล้เคียงกับหลอดทังสเตน หรือแหล่งกำเนิดแสง อื่นที่นำมาผ่านแผ่นกรองแสง มีอุณหภูมิของสีประมาณ 6700 K ใช้แทนแสงแดดตอนกลางวัน
- Illuminant D มีการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่นใกล้เคียงกับแสงแดดตอนกลางวัน แต่จะแบ่งละเอียดตามอุณหภูมิของสี จากสีเหลืองจนถึงสีน้ำเงิน เช่น D55, D60, D65 และ D75 โดย Illuminant 65 เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด

(2.2) วัตถุ(specimen)

วัตถุทึบแสง(opaque) ให้การสะท้อนแสง เพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุโปร่งแสง(translucent) และโปร่งใส(transparent) เมื่อวัตถุทึบแสง(opaque) ได้รับแสงกระทบจากภายนอก การสะท้อนแสงมี 2 ส่วน คือการสะท้อนแสงเสมือนจริง(specular reflection) และการสะท้อนแสงกระจาย(diffuse reflection) (รูปที่ 2.4) การสะท้อนแสงเสมือนจริง คือการสะท้อนแสงกลับจากวัตถุที่เหมือน และมีขนาดใกล้เคียงกับแสงตกกระทบแต่ทิศทางตรงข้าม การสะท้อนแสงเสมือนจริงแสดงออกมามากที่สุดเพียงร้อยละ 4 ของการสะท้อนแสงทั้งหมด(total reflection) ซึ่งเกิดในกรณีที่วัตถุมีผิวมันเงา 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการสะท้อนแสงเสมือนจริงในวัตถุที่ผิวมันเงาจะมากกว่าวัตถุผิวด้าน และผิวขรุขระตามลำดับ ส่วนการสะท้อนกระจายเป็นการสะท้อนแสงที่บริเวณผิวจากวัตถุไปทุกทิศทาง และมีขนาดเล็กกว่าแสงที่ตกกระทบมาก ซึ่งการสะท้อนแสงกระจายนี้ เป็นส่วนของการสะท้อนที่ใช้ในการวัดเฉดสี



รูปที่ 2.4 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุทึบแสง

แสงที่สะท้อนจากวัตถุสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขได้ โดยใช้เครื่องมือวัดการสะท้อนแสงที่เรียกว่า สเปคโตรโฟโตมิเตอร์(spectrophotometer) ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิง(reference) ได้เป็นกราฟของการสะท้อนแสง(reflectance curve) วัตถุที่มีสีต่างกันจะมีช่วงความยาวคลื่นที่สะท้อนแสงต่างกัน เช่น

วัตถุสีขาว แสงสะท้อนที่ทุกความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร

วัตถุสีน้ำเงิน แสงสะท้อนมากที่ความยาวคลื่น 430 - 460 นาโนเมตร

วัตถุสีเขียว แสงสะท้อนมากที่ความยาวคลื่น 500 – 530 นาโนเมตร

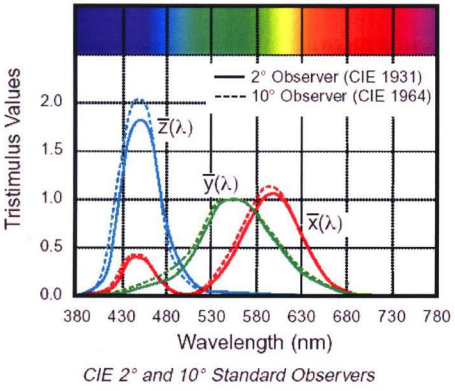
วัตถุสีเหลือง แสงสะท้อนมากที่ความยาวคลื่นของแสงสีเขียว เหลือง และแดง และจะมีการดูดกลืนแสงมากที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน

วัตถุสีแดง แสงสะท้อนมากที่ความยาวคลื่น 620 – 700 นาโนเมตร

วัตถุสีดำ แสงสะท้อนต่ำมากที่ทุกความยาวคลื่น หรือมีการดูดกลืนแสงตลอดความยาวคลื่น

(2.3) ผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน(observer)

การวัดสีต้องสามารถวัดค่าให้ได้สอดคล้องกับการสังเกตด้วยสายตาของมนุษย์ จากการทดลองของ Wright และ Guild สามารถหาค่าปริมาณการตอบสนองของดวงตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง เขียว น้ำเงิน ได้ค่าสรุปเป็นตัวเลขตามมาตรฐาน 2^{O} CIE Standard Observer 1964 และได้แก้ไขปรับปรุงให้มีค่าสอดคล้องกับการตอบสนองของดวงตาในช่วงแสงสีเขียว และสีน้ำเงินมากขึ้นเป็นมาตรฐาน 10^{O} CIE Standard Observer 1964 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 CIE 2° และ 10° standard observers

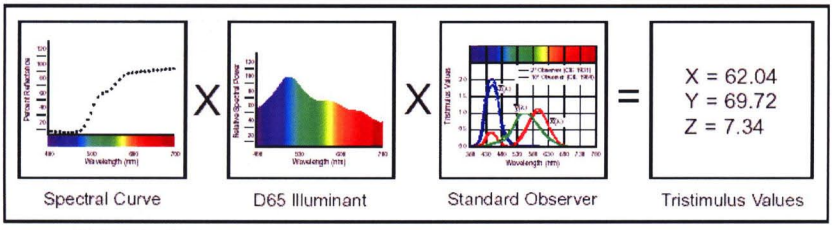
ที่มา: www.ncsu.edu/scivis/index.html

จากรูปที่ 2.5 $\overline{X}$ แสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง

$\overline{Y}$ แสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีเขียว

$\overline{Z}$ แสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีน้ำเงิน

โดยผลลัพธ์ตัวเลขที่ได้เกิดจากการนำองค์ประกอบทั้งสามชนิด ได้แก่ การสะท้อนแสงของวัสดุ แหล่งกำเนิดแสง และค่าจากผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน มาคูณกันได้เป็นค่าไตรสทิมูลัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6



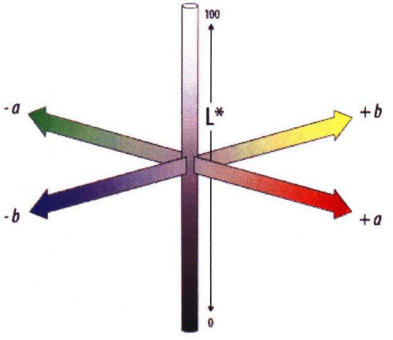
รูปที่ 2.6 ค่าไตรสทิมูลัส(tristimulus values)

ที่มา: www.ncsu.edu/scivis/index.html

ค่าไตรสทิมูลัส(tristimulus values) กำหนดสเกลวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง เขียว และน้ำเงิน ที่เมื่อนำมาผสมกันแบบรวม(additive mixture) จะให้สีที่เหมือนกับสีของวัสดุภายใต้

ภาวะที่กำหนด แต่เนื่องจาก ระบบดังกล่าวไม่สามารถบรรยายลักษณะความมืดสว่างของสีได้ CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นที่ยอมรับ และใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ ระบบ CIE 1976 L*a*b (CIELAB) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าโคออดิเนตของสีใน 3 มิติ

- แกน L* ใช้กำหนดค่าความสว่างของสี(lightness) จากค่า +L* แสดงถึงแสงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ
- แกน a* บรรยายแกนสีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (a*)
- แกน b* บรรยายแกนสีจากน้ำเงิน (-b*) ไปจนถึงเหลือง (b*)



รูปที่ 2.7 การบรรยายสีในระบบ CIE lab ในรูป 3 มิติ
ที่มา: www.ncsu.edu/scivis/index.html

จะเห็นว่าการวัดสีด้วยค่า L*, a*, b* ทำให้สามารถจินตนาการได้ว่าวัตถุนั้นมีสีอะไร และสามารถวัดความแตกต่างของสีได้สม่ำเสมอและมีขนาดเท่ากัน CIE จึงเสนอสมการดังต่อไปนี้

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad (2.1)$$

$$a^* = 500\left[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}\right] \quad (2.2)$$

$$b^* = 200\left[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}\right] \quad (2.3)$$

โดยที่ Xn ,Yn, Zn คือ ค่าค่าไตรสทิมูลัส ของการสะท้อนแสงสีขาว(reference white) ภายใต้ แหล่งกำเนิดแสงชนิดหนึ่ง(illuminant)

นอกจากการกำหนดโคออดิเนตแบบ L*a*b* แล้ว CIE ยังได้นำเสนอแนวความคิดในการมองเห็นสีเป็นเฉดสี(hue, h) และความเข้มของสี(chroma, C) ดังนี้

h* เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีมีหน่วยเป็นองศา เรียงตามลำดับสี แดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ม่วง

$$h = \tan^{-1} (b/a) \qquad (2.4)$$

C เป็นตัวเลขบ่งบอกความสดใสของเนื้อสีถ้ามีค่าน้อยสีจะทึบ และถ้ามีค่ามากเนื้อสีจะสดใส

$$C = (a^2 + b^2)^{1/2} \qquad (2.5)$$

(3) การวัดปริมาณตามทฤษฎีคูเบลคา - มองค์(The Schuster Kubelka and Munk Theory) (Etters and Herwitz, 1986)

ทฤษฎีของชูสเตอร์ คูเบลคา และมองค์(The Schuster Kubelka and Munk Theory) หาความสัมพันธ์ของการสะท้อนแสงของวัตถุ กับปริมาณสีในผ้าได้ซึ่งแสดงใน ดังสมการต่อไปนี้

$$K/S = (1-R)^2/2R \qquad (2.6)$$

K = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสง(absorption coefficient)

S = ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของแสง(scattering coefficient)

R = ค่าการสะท้อนแสงของสีบนผ้า ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร

จากค่า K/S โดย K และ S เป็นฟังก์ชันของการดูดซับแสง และการสะท้อนแสงบนวัตถุตามลำดับ เนื่องจากค่า K/S มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มของสี จึงกล่าวได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสีมาก ส่งผลให้ K/S มีค่ามาก

2.4 คุณภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม

คุณภาพน้ำใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แตกต่างกันขึ้นกับจุดประสงค์การใช้งาน เช่น การใช้น้ำผสมกับผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการบริโภค ใช้คุณภาพน้ำดื่มเป็นมาตรฐาน น้ำใช้ในการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบ อาจเป็นน้ำที่ผ่านการกรองทรายหรือฆ่าเชื้อโรคก็เพียงพอ น้ำใช้ในการหล่อเย็นเป็นน้ำที่มีความกระด้างต่ำ น้ำใช้ในหม้อไอน้ำแรงสูง และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ต้องเป็นน้ำบริสุทธิ์ เป็นต้น

2.4.1 โลหะในน้ำ

โลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ควรมีในปริมาณที่ต่ำมาก เช่น เหล็ก(Fe) 0.1 –1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แมงกานีส(Mn) 0.05 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียม(Mg) 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียม (Ca) 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมถึงโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรอยเปื้อนบนวัสดุ หรือทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการฟอกย้อม โดยเหล็ก และทองแดงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการฟอกขาวเกินปกติ เกิดการทำลายเส้นใย ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีส เมื่อรวมตัวกับกรดไขมัน ทำให้เกิดเป็นสบู่ที่ติดแน่นกับผ้ายากแก่การกำจัดออก ส่วนในกระบวนการย้อม เหล็ก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา(catalyst) ทำให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง หรือสีอาจเปลี่ยนเป็นสีสนิม ในการย้อมสีเบสิกทำให้สีมืดได้(N. Manivasakam.,1995: 21 - 30) ในน้ำส่วนใหญ่มีเหล็กมากกว่าแมงกานีส แต่เหล็กสามารถกำจัดออกไปได้ง่ายกว่า ด้วยการให้อากาศ(aeration) การตกตะกอน(precipitation) การกรอง(filtration) หรือโดยการแลกเปลี่ยนไอออน(ion exchange)

(1) เหล็ก และแมงกานีส (iron and manganese)

ปกติเหล็กในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน(น้ำบาดาล) จะอยู่ในรูปของเกลือเฟอร์รัส (Fe^{2+}) หรือ สารอินทรีย์เชิงซ้อน ที่พบในน้ำบาดาลอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต($Fe(HCO_3)_2$) และเฟอร์รัสคลอไรด์($FeCl_2$) ถ้าพีเอชของน้ำบาดาลต่ำกว่า 3 เหล็กอยู่ในสภาพของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ไอออนเหล็กในน้ำบาดาลส่วนมากมาจากหินอัคนี หินทราย(sandstone) หินดินดาน(shale) ปริมาณเฟอร์รัสไอออนในน้ำบาดาล ถูกกำหนดด้วยการละลายของเฟอร์รัสคาร์บอเนต ถ้าพีเอชอยู่ระหว่าง 6 - 8 และมีไบคาร์บอเนตอยู่ด้วยจะมีเฟอร์รัสไอออน 1 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้เหล็กยังเกิดจากสนิมเหล็กในท่อ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีสนิม และเกิดจากการเติบโตของ iron bacteria

แมงกานีสไม่ค่อยพบมากเหมือนเหล็ก ในน้ำบาดาลปกติมีอยู่น้อยหรือไม่มีเลย ถ้ามีจะอยู่ในรูปของ Mn^{2+} ที่เป็นเกลือของโลหะ หรือเป็นสารเชิงซ้อนที่ละลายอยู่ในน้ำ แต่ส่วนมากอยู่ในรูป

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

คาร์บอเนต แมงกานีสในน้ำส่วนใหญ่มาจากชั้นหินชั้น หรือหินแปร ซึ่งพบในรูปของแมงกานีสออกไซด์ คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์เมื่อมีสภาพรีดิวซ์เกิดขึ้น

เหล็ก และแมงกานีสในรูปที่ไม่ละลาย จะเปลี่ยนจากสภาพที่ไม่ละลายเป็นสภาพที่ละลาย โดยมีวาเลนซีเท่ากับสอง การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เพราะสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในดินเน่าสลายจึงต้องการออกซิเจน และปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดสภาพรีดิวซ์ เมื่อน้ำซึมผ่านดิน คาร์บอนไดออกไซด์ จะละลายน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกทำให้พีเอชลดลง ซึ่งช่วยเสริมสภาพรีดิวซ์ ถ้าน้ำไม่มีโอกาสสัมผัสกับอากาศ เหล็กและแมงกานีสจะอยู่ในสภาพสารละลาย ดังสมการ

ไร้อากาศ

$$FeCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Fe(HCO_3)_2 \qquad (2.7)$$

ไร้อากาศ

$$MnCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Mn(HCO_3)_2 \qquad (2.8)$$

น้ำบาดาล เมื่อสูบขึ้นมาใช้ จะสัมผัสกับอากาศ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น แสดงในสมการ

$$4Fe(HCO_3)_2 + 2O_2 + H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 8CO_2 \qquad (2.9)$$

$$2Fe(OH)_3 \longrightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O \qquad (2.10)$$

$$Mn(HCO_3)_2 \longrightarrow Mn_2^+ + 2\ HCO_3^- \qquad (2.11)$$

$$Mn_2^+ + 1/2O_2 + H_2O \longrightarrow MnO_2 + 2H^+ \qquad (2.12)$$

ตะกอนของ $Fe(OH)_3$, Fe_2O_3 มีสีแดงแบบสนิมเหล็ก ส่วน MnO_2 มีลักษณะเป็นตะกอนผงละเอียดสีดำ

(2) แคลเซียม(calcium)

แคลเซียมเป็นสาเหตุของความกระด้าง และการเกิดตะกรันในที่ต่าง ๆ ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในน้ำประปาคือ 75.0 มิลลิกรัมต่อลิตร(มั่นสิน, 2538: 81)

(3) แมกนีเซียม(magnesium)

แมกนีเซียมเป็นธาตุคู่กับแคลเซียม เป็นต้นเหตุของความกระด้าง และตะกรัน แมกนีเซียมทำให้น้ำมีรสไม่ชวนดื่ม ระดับสูงสุดของแมกนีเซียมในน้ำประปาคือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่อาจอนุญาตให้มีได้ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร (มั่นสิน, 2538: 81)

ACM 667.26 ข153ผ
ขนิษฐา เจริญลาภ
ผลของโลหะในน้ำต่อกระบวนการย์
อม= Effects of Metal in Wate
32000000955130 0946

(4) ทองแดง(copper)

เกลือทองแดงที่ละลายอยู่ในน้ำ แม้จะมีจำนวนน้อย ก็สามารถชักนำให้ท่ออะลูมิเนียม และท่อเหล็กอาบสังกะสีเป็นสนิม และผุกร่อน น้ำประปาอาจได้รับทองแดงจากการผุกร่อน หรือละลายตัวของท่อทองแดง การใช้คอปเพอร์ซัลเฟต($CuSO_4$) ในการป้องกันสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบ อาจทำให้ระดับทองแดงในน้ำดิบ และน้ำประปา มีปริมาณสูงขึ้นได้ น้ำประปา หรือน้ำดิบไม่ควรมีทองแดงสูงกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่อาจอนุญาตให้มีได้ถึง 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (มั่นสิน, 2538: 81)

2.4.2 ความกระด้างของน้ำ(water hardness)

ความกระด้างของน้ำเป็นการวัดความสามารถของน้ำในการตกตะกอนสบู่ เกิดจากธาตุที่มีประจุบวกสองขึ้นไปละลายเจือปนอยู่ในน้ำ ธาตุสำคัญที่ทำให้เกิดความกระด้างคือแคลเซียม(Ca^{2+}) และแมกนีเซียม(Mg^{2+}) และอาจมีธาตุอื่น ๆ เช่น อะลูมิเนียม(Al^{3+}) เหล็ก(Fe^{2+}) แมงกานีส(Mn^{2+}) สตรอนเชียม(Sr^{2+}) และสังกะสี(Zn^{2+}) แต่เนื่องจากแคลเซียม และแมกนีเซียม มีอยู่ในน้ำเป็นปริมาณมาก จึงให้คำจำกัดความความกระด้างของน้ำเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต($CaCO_3$) อย่างไรก็ตาม ถ้าไอออนตัวอื่น ๆ ดังกล่าวข้างต้นมีอยู่ในน้ำเป็นจำนวนมากก็ต้องคิดรวมด้วย

ตารางที่ 2.2 ไอออนประจุบวกและไอออนประจุลบที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ

ไอออนประจุบวก	ไอออนประจุลบ
Ca^{2+}	HCO_3^-
Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Sr^{2+}	Cl^-
Fe^{2+}	NO_3^-
Mn^{2+}	SiO_3^-

ที่มา : C.N. Sawyer, P.L. Mccarty, and G.F.Perkin, 2003: 564.

น้ำจากแหล่งต่าง ๆ มีความกระด้างไม่เท่ากัน น้ำใต้ดินมีความกระด้างสูงกว่าน้ำผิวดิน ในการแบ่งความกระด้างของน้ำ อาจยึดถือหลักตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระดับความกระด้างของน้ำตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

ความกระด้าง (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	สภาพน้ำ
0-75	น้ำอ่อน
75-150	ค่อนข้างกระด้าง
150-300	กระด้าง
มากกว่า 300	กระด้างมาก

ที่มา: C.N. Sawyer, P.L. Mccarty, and G.F.Perkin, 2003: 564

ความกระด้างของน้ำในธรรมชาติ เกิดจากน้ำฝนตกผ่านชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ละลายเอาแก๊สนี้ส่วนหนึ่งไว้ในน้ำ และเมื่อไหลผ่านชั้นดินซึ่งมีการเน่าสลายตัวของพืชสีเขียวที่เกิดจากแบคทีเรีย ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา และเมื่อแก๊สนี้ละลายในน้ำจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก(H_2CO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อนสลายตัวได้ง่าย

เมื่อน้ำไหลผ่านพื้นดินลงไป ผ่านชั้นหินที่ประกอบด้วย แคลเซียมคลอไรด์($CaCl_2$) แมกนีเซียมคลอไรด์($MgCl_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต($MgSO_4$) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ง่าย แคลเซียมซัลเฟต($CaSO_4$) ละลายน้ำได้บ้าง ส่วนแมกนีเซียม และแคลเซียมคาร์บอเนตละลายน้ำได้เล็กน้อย เมื่อน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ จะมีสมบัติที่ละลายหินปูน($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต($MgCO_3$) เกิดเป็น แคลเซียมไบคาร์บอเนต($Ca(HCO_3)_2$) และแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต($Mg(HCO_3)_2$) ไบคาร์บอเนตเหล่านี้ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้น้ำกระด้าง เพราะสารเหล่านี้ละลายน้ำได้ง่าย ความกระด้างในน้ำที่มีอยู่ทุกประเภทรวมเรียกว่า ความกระด้างทั้งหมด(total hardness) อาจแบ่งชนิดของความกระด้างตามไอออนที่มีอยู่ในน้ำเป็น 2 ประเภทดังนี้

(1) ความกระด้างแบ่งตามไอออนลบ

ความกระด้างคาร์บอเนต หรือความกระด้างชั่วคราว(carbonate or temporary hardness) ได้แก่ คาร์บอเนต(CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต(HCO_3^-) ในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของความกระด้างโดยอยู่ในรูปของแคลเซียมไบคาร์บอเนต($Ca(HCO_3)_2$) แคลเซียมคาร์บอเนต($CaCO_3$) แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต($Mg(HCO_3)_2$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต($MgCO_3$) เหตุที่เป็นความกระด้างชั่วคราว เพราะเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 54.5 องศาเซลเซียสความกระด้างจะสลายตัวได้ดังนี้

$$Ca(HCO_3)_2 + \text{ความร้อน} \longrightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad (2.13)$$

$$Mg(HCO_3)_2 + \text{ความร้อน} \longrightarrow MgCO_3 + H_2O + CO_2 \quad (2.14)$$

$$MgCO_3 + H_2O + \text{ความร้อน} \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.15)$$

จากสมการจะเห็นว่าปฏิกิริยาการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ถ้าเป็นหม้อไอน้ำแก๊สนี้จะติดไปกับไอน้ำ และเมื่อไอน้ำกลั่นตัวควบแน่นเป็นน้ำ ทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดอ่อน ความกระด้างชั่วคราวนี้บางครั้ง เรียกว่าความกระด้างอัลคาไลน์(alkaline hardness)

ความกระด้างที่ไม่ใช่คาร์บอเนตหรือความกระด้างถาวร(non - carbonate or permanent hardness) ได้แก่ ซัลเฟต(SO_4^{2-}) และคลอไรด์(Cl^-) ในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของความกระด้างโดยอยู่ในรูปของแคลเซียมซัลเฟต($CaSO_4$), แคลเซียมคลอไรด์($CaCl_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต($MgSO_4$) และแมกนีเซียมคลอไรด์($MgCl_2$) ไม่สามารถกำจัดได้โดยการต้ม ความกระด้างถาวรนี้อาจ เรียกว่าความกระด้างนอนอัลคาไลน์(non-alkaline hardness)

(2) ความกระด้างแบ่งตามไอออนประจุบวก

ได้แก่ ความกระด้างแคลเซียม(calcium hardness) และความกระด้างแมกนีเซียม (magnesium hardness) หรืออาจเป็นทั้งแคลเซียม และแมกนีเซียม

นอกจากนี้ยัง พบว่าปริมาณโซเดียมที่มีมากในน้ำสามารถขัดขวางการเกิดฟองของสบู่ และทำให้น้ำมีรสกร่อย ซึ่งไม่จัดเป็นความกระด้างที่แท้จริง เรียกว่าความกระด้างเทียม(pseudo hardness)

ความกระด้างจากแคลเซียม และ แมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับสบู่ เกิดสบู่ของแคลเซียม และแมกนีเซียมที่เกาะติดผ้าและเครื่อง ทำให้วัสดุสิ่งทอด่างหลังการย้อม การกำจัดความกระด้างโดยปกติมักทำในรูปของการแลกเปลี่ยนไอออน หรือใช้สารอีดีทีเอ จับแคลเซียม และแมกนีเซียมไว้

ตารางที่ 2.4 ผลของความกระด้างของน้ำต่อกระบวนการทางเคมีสิ่งทอ

กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ	ผลจากความกระด้างของน้ำ
การลอกแป้ง	ลดความสามารถการทำงานของเอนไซม์(deactivate enzymes)
	ทำให้สารลงแป้ง(แป้ง,พีวีเอ) ตกตะกอน
การทำความสะอาด	ทำให้สบู่ตกตะกอน
	ทำให้ผ้าเกิดคราบสีเหลือง
	ลดความสามารถในการดูดซึมน้ำของผ้า
การฟอกขาว	ทำให้สารฟอกขาวสลายตัว
การเมอร์ซิไรส์	ทำให้เกิดตะกอนของโลหะออกไซด์ ลดความสามารถในการดูดซึมน้ำ ลดความมันวาว
การย้อม	ทำให้ผ้าย้อมด่าง
การตกแต่งสำเร็จ	ทำให้เกิดตะกอนของโลหะออกไซด์ ลดความสามารถในการดูดซึมน้ำ ลดความมันวาว

2.4.3 คุณภาพของน้ำใช้ในกระบวนการสิ่งทอ

น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญระบบหนึ่งของอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมฟอกย้อม น้ำเป็นตัวแปรหลัก ที่ทำให้การย้อมสีถูกต้องในครั้งแรก(right first time) เนื่องจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำ อาจทำปฏิกิริยากับสี และสารเคมีต่าง ๆ ตกตะกอนได้ โดยคุณภาพน้ำใช้ แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณภาพน้ำใช้ในกระบวนการทางสิ่งทอ

พารามิเตอร์ของน้ำ	ค่าที่ยอมรับได้
ความขุ่น(turbidity)	< 5 เอ็นทียู
ของแข็งแขวนลอย(suspended solids)	< 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งทั้งหมด(total solids)	< 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
สี(color)	< 10 หน่วย
พีเอช (pH)	7 - 9
ค่าความเป็นกรด – ด่าง(acidity/alkalinity)	< 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต
ค่าความกระด้าง(hardness)	< 70 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต
เหล็ก(iron)	< 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส(manganese)	< 0..05 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง(copper)	< 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว(lead)	< 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
อะลูมิเนียม(aluminium)	< 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซิลิกา(silica)	< 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟต(sulphate)	< 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์(sulphide)	< 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอไรด์(chloride)	< 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์บอนไดออกไซด์(carbon dioxide)	< 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเทรต(nitrate)	< 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอรีน(chlorine)	< 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
แอมโมเนีย(ammonia)	< 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไขมัน, น้ำมัน(fat,oil,grease)	< 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: N.Manivasakarn., 1995: 35.

หากคุณภาพน้ำใช้ไม่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนด เป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตได้ ดังนี้

(1) การใช้น้ำในการผลิตหม้อไอน้ำ(boiler) ถ้าน้ำมีความกระด้าง ซึ่งมีสาเหตุจากเกลือของแคลเซียม และแมกนีเซียม เกลือเหล่านี้เมื่อถูกความร้อนจะเกิดการตกตะกอนเป็นตะกรันแข็ง

จับอยู่บริเวณพื้นผิวที่ให้ความร้อน ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อผลิตไอน้ำลดลง สิ้นเปลืองพลังงาน

(2) ในกระบวนการเตรียมผ้า น้ำกระด้างซึ่งมีไอออนของโลหะแคลเซียม หรือแมกนีเซียม เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผ้า อาจทำให้เกิดคราบขาวของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสังเกตเห็นได้ยาก ทำให้บริเวณดังกล่าวไม่ดูดซึมน้ำ การดูดซึมเคมีต่าง ๆ ของผ้าจึงไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำผ้าไปย้อม ทำให้ย้อมสีได้ไม่สม่ำเสมอ(เกษม, 2537)

(3) ในกระบวนการพิมพ์ ถ้าน้ำมีโลหะหนักปนเปื้อน มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสี ทำให้สีไม่ละลาย และถ้าสารโลหะหนักเหล่านี้ไปอยู่กับสารข้น(thickener) โดยเฉพาะประเภทโซเดียมอัลจีเนต(sodium alginate) ทำให้สีตกตะกอน

(4) ในกระบวนการซักล้างโดยใช้สบู่(soap) เป็นสารช่วยซัก(washing agent) ถ้าน้ำมีความกระด้างสูง ผลของการเป็นสารช่วยซักจะลดลง เนื่องจากสบู่ทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะหนักในน้ำกระด้าง ทำให้เกิดสบู่ที่ไม่ละลายน้ำ(insoluble soap) เกิดเป็นตะกอนติดบนผ้า ซึ่งมีผลในการนำไปย้อม โดยทำให้ผ้าที่ผ่านการย้อมแล้วมีความไม่สม่ำเสมอ ตลอดจนผิวสัมผัสของผ้าไม่ดี

(5) ในกระบวนการย้อม ถ้าน้ำมีปริมาณความกระด้าง เหล็ก และแมงกานีสเกินมาตรฐานซึ่งมีผลต่อการย้อมสี กล่าวคือไอออนของโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน(form complex) กับโมเลกุลสีก่อนที่สีทำปฏิกิริยากับเส้นใย(color change) ทำให้สีกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นเม็ดสี หรือตะกอนสี ติดบนผ้าทำให้ผ้าเกิดรอยด่างเป็นจุดหรือคราบสี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.W. Rucker and C.B. Smoth. 1995. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเตรียมสิ่งทอ พบว่าโลหะไอออนบางชนิด เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกระบวนการฟอก ทำให้เส้นใยถูกทำลาย และผ้าขาดเป็นรูขนาดเล็ก(pin hole)

J.E. Mock and H.T. Jennings. 1996. ศึกษาคุณภาพน้ำที่มีผลต่อการประสิทธิภาพการซักรีด พบว่าคุณภาพน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด ต่อความสะอาดของผ้า โดยปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำ โดยเฉพาะแคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเป็นสาเหตุความกระด้างของน้ำ ทำให้คุณภาพของผ้าต่างจากการซักด้วยน้ำอ่อน นอกจากนี้ พบว่าการที่ในน้ำมีปริมาณของเหล็กสูงทำให้เกิดรอยเปื้อนบนผ้า

K.W. Yeung and S.M. Shang. 1999. ศึกษาอิทธิพลของโลหะไอออนต่อการรวมตัว และการตกตะกอนของสารละลายสีย้อม ผลการทดลอง พบว่าแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน มีผลต่อการรวมตัว และการตกตะกอนของสารละลายสีย้อมมากกว่าโซเดียมไอออน และในภาวะที่เป็นกรดทำให้โลหะไอออนละลายน้ำได้ดี มีผลต่อการตกตะกอนของสีย้อมมากขึ้น

D.T. Parkes. 2005. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการปรับปรุงคุณภาพการย้อม พบว่าปัจจัยที่ต้องระมัดระวังมากคือปริมาณโลหะในน้ำ เนื่องจากจะทำให้สีย้อมตกตะกอน เกิดปัญหาการย้อมด่าง และเฉดสีเปลี่ยนไม่ตรงตามความต้องการ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ตารางที่ 3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์	รุ่น	บริษัท
เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง	Mattler AE 200	Mettler Toledo
เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง	Mattler PJ 3000	Mettler Toledo
เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง	Cyberscan 2500 ^{pH}	Eutech instruments
เครื่องย้อมที่ความดันปกติ	OSCI color	Rapid Co., Ltd.
เครื่องทดสอบการซักฟอก	TE/C4 high temperature dye bath	Linitest
เครื่องวัดค่าการสะท้อนแสง	Spectral check plus	Data color
ตู้อบ	U26	Memmert
เครื่องอะตอมมิกแอบซอพชั่น สเปคโตรโฟโตมิเตอร์	GBC932plus	GBC Scientific

3.1.2 สารเคมี

(1) สารละลายมาตรฐานแคลเซียม แมกนีเซียม ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส

(2) สีย้อมรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R gran, Sumifix HF Red G gran, Sumifix Yellow 3R gran)

(4) โซเดียมไฮดรอกไซด์

(5) โซเดียมคลอไรด์

(6) โซเดียมซัลเฟต

(7) โซเดียมคาร์บอเนต(sodium carbonate)

(8) สารลดแรงตึงผิว(surfactant) ชื่อทางการค้า Unipal UNS conc.

3.1.3 วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาชนิด และปริมาณของโลหะในผ้าฝ้ายถัก

(1) สุ่มผ้าฝ้ายถักจากผ้า 3 ม้วน โดยสุ่มที่บริเวณต่าง ๆ 6 ตำแหน่ง

(2) นำผ้าไปอบที่ 100 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ชั่งให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม

(3) ละลายด้วยกรดไนทริกเข้มข้น ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน(deionized water)

(4) วิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมผ้าก่อนย้อม(การกำจัดสิ่งสกปรก และการฟอกขาว)

(1.1) ชั่งผ้าฝ้ายดิบหนัก 1000 กรัม กำจัดสิ่งสกปรกที่อุณหภูมิ 90 – 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างน้ำ: ผ้า เท่ากับ 1: 30 โดยใส่สารดังนี้

สารลดแรงตึงผิว	30 กรัม
โซเดียมไฮดรอกไซด์	90 กรัม
น้ำ	30 ลิตร

(1.2) เมื่อครบเวลาที่กำหนด ล้างผ้า แล้วนำไปฟอกขาวที่อุณหภูมิ 90 – 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที อัตราส่วนระหว่างน้ำ: ผ้า เท่ากับ 1: 30 โดยใส่สารดังนี้

สารลดแรงตึงผิว	15 กรัม
โซเดียมไฮดรอกไซด์	90 กรัม
สารควบคุมการแตกตัว	30 กรัม
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(50%)	90 กรัม
น้ำ	30 ลิตร

(1.3) เมื่อครบเวลาที่กำหนด ล้างผ้าด้วยน้ำร้อนแล้วตามด้วยน้ำเย็นจนสะอาด ตรวจสอบด่างตกค้างบนผ้าด้วยฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์

(1.4) หากพบว่ามีด่างตกค้าง ปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดแอซิติกเจือจาง ล้างตามด้วยน้ำสะอาด แล้วตากให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาผลของโลหะในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

(1) ผลของแคลเซียมต่อประสิทธิภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

ตัวแปรคุม ชนิดสี

ตัวแปรตาม ระดับความเข้มสีบนผ้า ความแตกต่างของสี ความคงทนต่อการซัก

ตัวแปรอิสระ ความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำที่ใช้ย้อมมีความเข้มข้นดังนี้ 10, 20, 30, 40, 50 และ100 มิลลิกรัมต่อลิตร

วัสดุ ผ้าฝ้ายถักที่ผ่านการกำจัดสิ่งสกปรกและการฟอกขาวแล้ว

เครื่องจักร เครื่องย้อม

วิธีการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ ที่ความเข้มข้น 2% owf[1]

(1.1) ตัดผ้าฝ้ายถักที่ผ่านกระบวนการเตรียม หนัก 5 กรัม

(1.2) เตรียมสารละลายสำหรับใช้ในกระบวนการย้อม

อัตราส่วนของน้ำที่ใช้ในการย้อมต่อน้ำหนักผ้า	20 : 1	
สีรีแอคทีฟ	2 %	
โซเดียมซัลเฟต	40	กรัมต่อลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต	20	กรัมต่อลิตร

(1.3) ให้ความร้อนจนอุณหภูมิของสารละลาย 70 องศาเซลเซียส ค่อย ๆ เติม โซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร

(1.5) ให้ความร้อนของสารละลายคงที่ 70 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ค่อย ๆ เติม โซเดียมคาร์บอเนต 20 กรัมต่อลิตร แล้วให้ความร้อนต่ออีก 60 นาที

(1.6) เมื่อครบกำหนดเวลา นำผ้าออกมาล้างด้วยน้ำร้อน ตามด้วยน้ำเย็น และ ล้างต่อด้วยน้ำไหลตามลำดับ

(1.7) soap ด้วยน้ำประปา ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำร้อน และน้ำเย็นตามลำดับ

---

[1] %owf หมายถึงปริมาณสี 2 กรัมบนผ้า 100 กรัม

(2) ผลของแมกนีเซียม ต่อประสิทธิภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

วิธีการทดลองเหมือนข้อ(1) แต่เปลี่ยนชนิดโลหะในน้ำเป็นแมกนีเซียม

(3) ผลของทองแดงต่อประสิทธิภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

วิธีการทดลองเหมือนข้อ(1) แต่เปลี่ยนชนิดโลหะในน้ำเป็นทองแดง โดยใช้ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) ผลของเหล็กต่อประสิทธิภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

วิธีการทดลองเหมือนข้อ(1) แต่เปลี่ยนชนิดโลหะในน้ำเป็นเหล็กโดยใช้ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ผลของแมงกานีสต่อประสิทธิภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

วิธีการทดลองเหมือนข้อ(1) แต่เปลี่ยนชนิดโลหะในน้ำเป็นแมงกานีสโดยใช้ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ขั้นตอนที่ 4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

(1) วัดปริมาณโลหะหนักในผ้า ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอพชั่น สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

(2) วัดระดับความเข้มสีบนผ้า ด้วยเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสง(reflectance spectrophotometer) ได้ค่าการสะท้อนแสงที่ 400 – 700 นาโนเมตร คำนวณให้เป็นค่า K/S

(2) วัดค่าความแตกต่างของสี ด้วยเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสง วัดค่า L*, a*, b*

(2) วัดค่าความคงทนต่อการซัก นำผ้าฝ้ายถักที่ผ่านการย้อมมาทดสอบความคงทนต่อการซักตามมาตรฐาน ISO 105-C06: 1994 (E) Color fastness to domestic commercial laundering

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ และสมมติฐานดังนี้

(1) วิเคราะห์ปริมาณโลหะในผ้าฝ้ายจากค่าเฉลี่ย และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน(coefficient of variation, %C.V.)

(2) วิเคราะห์ระดับความเข้มสีบนผ้าจากค่าเฉลี่ย

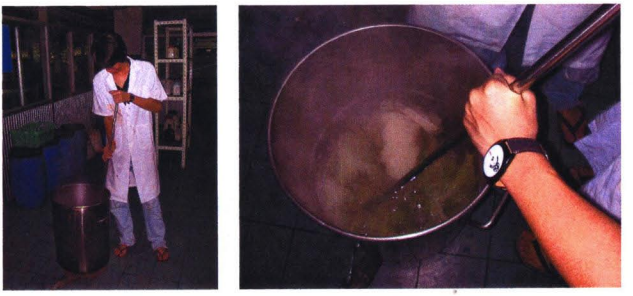
(3) วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าจากค่าเฉลี่ย และทดสอบค่าเฉลี่ยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว(one - way analysis of varience) โดยการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ณ ระดับ 0.05 เมื่อพบว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่ากลางด้วยวิธีของเชฟเฟ่

(4) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะกับค่าความแตกต่างของสี โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน(Pearsons' product moment correlation coefficient)

(5) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะ และการลดลงของระดับความเข้มสีหลังการซัก โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน(Pearsons' product moment correlation coefficient)

3.3 สถานที่ทดลอง

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รูปที่ 3.1 การเตรียมผ้าก่อนย้อม

รูปที่ 3.2 การเตรียมน้ำย้อม

รูปที่ 3.3 การย้อมผ้า

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาปริมาณโลหะในผ้าฝ้ายถัก

ศึกษาปริมาณโลหะในผ้าฝ้าย ทดลองโดยนำผ้าฝ้ายถักโครงสร้างซิงเกิ้ลเจอร์ซี่(single jersey) วิเคราะห์ปริมาณโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส แมกนีเซียม และ แคลเซียม ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1.1

ตารางที่ 4.1.1 ชนิด และปริมาณของโลหะในผ้าฝ้าย(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

ตำแหน่ง	เหล็ก	แมงกานีส	แมกนีเซียม	แคลเซียม
1	35.3000	1.2000	7.8000	34.7000
2	33.4000	1.2000	5.0000	33.5400
3	36.6000	1.1000	7.1000	35.5500
4	38.7000	1.5000	6.9000	35.7800
5	31.2000	1.5000	5.8000	33.0000
6	38.9000	1.1000	9.4000	34.5900
ค่าเฉลี่ย	35.68	1.27	7.00	34.53
C.V.(%)	8.464126	14.96063	22.00	3.156675

ผลจากตารางที่ 4.1.1 แสดงว่า ในผ้าฝ้ายถักมีการปนเปื้อนของโลหะประเภท เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส ในปริมาณ 35.68, 34.60, 7.00 และ 1.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ D.T. Park., 2005. ซึ่งศึกษาชนิด และปริมาณโลหะในฝ้ายดิบจากแต่ละแหล่ง พบว่า ฝ้ายดิบจากซูดานมี แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส ในปริมาณ 791.00, 617.00, 89.00 และ 9.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ฝ้ายดิบจากโคลัมเบีย มี แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส ในปริมาณ 1100.00, 808.00, 252.00 และ 10.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และฝ้ายดิบจากรัสเซียมี แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส ทองแดง ในปริมาณ 1888.00, 1055.00, 187.00, 36.00 และ 3.00 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งการปนเปื้อนของโลหะเหล่านี้ เกิดจากฝ้ายดูดซับโลหะต่าง ๆ จากดิน ส่งผลให้ผ้าฝ้ายที่ผลิตจากฝ้ายในแต่ละแหล่งปลูก มีคุณภาพที่แตกต่างกัน

4.2 ผลของปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายอักด้วยสีรีแอคทีฟ

นำผ้าฝ้ายอักมาย้อมด้วยสีรีแอคทีฟด้วยสีน้ำเงิน(Sumifix HF Blue 2R Gran) สีแดง (Sumifix HF Red G Gran) และสีเหลือง(Sumifix HF Yellow 3R Gran) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ด้วยน้ำที่มีปริมาณแคลเซียม 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับการย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน(deionization water) โดยในแต่ละสีทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

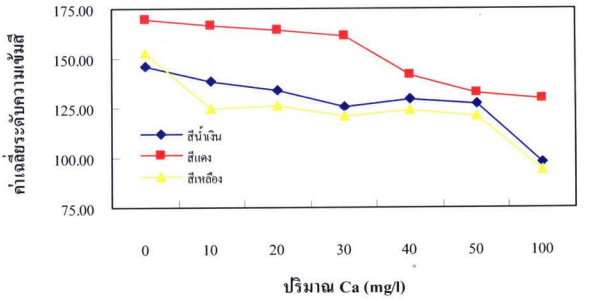
4.2.1 ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อระดับความเข้มสี(color yield, K/S) บนผ้า

นำผ้าที่ผ่านการย้อม มาวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ D65 ซึ่งให้แสงที่มีสเปคตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับแสงแดดในตอนกลางวัน ได้ผลรวมระดับความเข้มของสี (color yield, K/S) ตามตารางผนวกที่ 1ก – 3ก นำค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมในปริมาณแคลเซียมต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบว่า ปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมต่างกัน ทำให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มของสีบนผ้าต่างกันหรือไม่ ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2.1 และรูปที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.2.1 การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน

ชนิดของสีย้อม	แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
สีน้ำเงิน	ระหว่างกลุ่ม	7081.703	6	1180.284	29.987*
(Sumifix HF Blue 2R Gran)	ภายในกลุ่ม	1102.066	28	39.360	
	รวม	8183.769	34		
สีแดง	ระหว่างกลุ่ม	8643.029	6	1440.505	173.718*
(Sumifix HF Red G Gran)	ภายในกลุ่ม	232.181	28	8.292	
	รวม	8875.210	34		
สีเหลือง	ระหว่างกลุ่ม	8819.503	6	1469.917	119.597*
(Sumifix HF Yellow 3R Gran)	ภายในกลุ่ม	344.137	28	12.291	
	รวม	9163.640	34		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 4.2.1 ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแคลเซียมต่าง ๆ

ผลจากตารางที่ 4.2.1 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมในปริมาณแคลเซียมต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$) และจากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้วิธีของเชฟเฟ่ ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 16ก - 19ก โดยมีผลทดสอบดังนี้

- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน และสีแดง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแคลเซียม 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีเหลือง พบว่า ทุกปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมมีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.2.1 และผลทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ ด้วยวิธีของเชฟเฟ่ แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้า ขึ้นกับปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม และเฉดของสีย้อม โดยค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมเพิ่มขึ้น การย้อมด้วยสีแดงให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีสูงที่สุด รองลงมาเป็นสีเหลือง และสีน้ำเงินตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2.1 จากผลการทดลองปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมสำหรับการย้อมน้ำเงินและสีแดง ควรอยู่ในช่วง 0.00 – 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในการย้อมสีเหลืองควรมีปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานจริง จึงแนะนำว่าการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ ในทุกเฉดสีควรมีปริมาณแคลเซียมในน้ำได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.2 ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อความแตกต่างของสีบนผ้า

การกำหนดมาตรฐานลำดับชั้นสีในปัจจุบันนิยมใช้ระบบ CIE 1976 L*a*b (CIELAB) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าโคออดิเนตของสีใน 3 มิติ โดย

L* ใช้กำหนดค่าความสว่างของสี(lightness) จากค่า +L* แสดงถึงแสงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ

a* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว a* เป็นบวก หมายถึงวัตถุมีสีออกแดง a* เป็นลบหมายถึงวัตถุมีสีออกเขียว

b* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน b* เป็นบวก หมายถึงวัตถุมีสีออกเหลือง b* เป็นลบหมายถึงวัตถุมีสีออกน้ำเงิน

ในการทดลองนี้วัดความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีน้ำเงิน แดง และเหลือง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน โดยนำผ้าที่ผ่านการย้อมมาวัดค่า L*, a*, b* ด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 1ข – 3ข และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียม และค่า L*, a*, b* โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2.2

ตารางที่ 4.2.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน

ชนิดสี	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมกับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
สีน้ำเงิน	CIE L	35	-0.971**
	CIE a	35	-0.884**
	CIE b	35	0.833**
สีแดง	CIE L	35	-0.515**
	CIE a	35	-0.339*
	CIE b	35	-0.670**
สีเหลือง	CIE L	35	-0.941**
	CIE a	35	-0.540**
	CIE b	35	-0.622**

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.2.2 แสดงว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมมากขึ้น ทำให้ผ้าย้อมมีความแตกต่างของสีต่างกัน ดังนี้

- ผ้ามีความสว่างของสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)
- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน มีสีออกไปทางเขียว และเหลืองมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)
- ผ้าย้อมสีแดง มีสีออกไปทางเขียวมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$) และมีสีน้ำเงินมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)
- ผ้าย้อมสีเหลืองมีสีออกไปทางเขียว และน้ำเงินมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)

4.2.3 ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความคงทนของผ้าต่อการซัก

ศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยวิธีตามมาตรฐาน ISO 105-C06: 1994(E) ได้ผลดแสดงในตารางผนวกที่ 1ค นำผ้าที่ผ่านการซักล้าง มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าระดับความเข้มสีที่ลดลง กับปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2.3

ตารางที่ 4.2.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสี หลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมในปริมาณแคลเซียมต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม กับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
การลดลงของสีน้ำเงินหลังการซัก	7	0.971**
การลดลงของสีแดงหลังการซัก	7	0.864*
การลดลงของสีเหลืองหลังการซัก	7	0.764*

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.2.3 แสดงว่า ปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของระดับความเข้มสีของผ้าภายหลังการซัก กล่าวคือ เมื่อปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมมากขึ้น ระดับความเข้มสีหลังการซักจะลดลงมากตามไปด้วย แสดงว่า ปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมมีผลให้ผ้ามีความคงทนของสีต่อการซักลดลง

4.3 ผลของปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายฉีกด้วยสีรีแอคทีฟ

นำผ้าฝ้ายฉีกมาย้อมด้วยสีรีแอคทีฟด้วยสีน้ำเงิน(Sumifix HF Blue 2R Gran) สีแดง (Sumifix HF Red G Gran) และสีเหลือง(Sumifix HF Yellow 3R Gran) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ด้วยน้ำที่มีปริมาณ แมกนีเซียม 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับการย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ในแต่ละสีทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

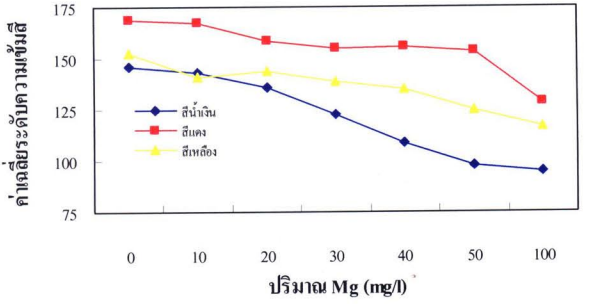
4.3.1 ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าระดับความเข้มสี(color yield, K/S) บนผ้า

นำผ้าที่ผ่านการย้อม มาวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ค่าผลรวมระดับความเข้มสี(color yield, K/S) ตามตารางผนวกที่ 4ก – 6ก นำค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมในปริมาณแมกนีเซียมต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบว่า ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมต่างกันทำให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มของสีบนผ้าต่างกันหรือไม่ ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3.1 และรูปที่ 4.3.1

ตารางที่ 4.3.1 การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน

ชนิดของสีย้อม	แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
สีน้ำเงิน	ระหว่างกลุ่ม	13689.002	6	2281.500	103.090*
(Sumifix HF Blue 2R Gran)	ภายในกลุ่ม	619.672	28	22.131	
	รวม	14308.675	34		
สีแดง	ระหว่างกลุ่ม	5424.484	6	904.081	23.287*
(Sumifix HF Red G Gran)	ภายในกลุ่ม	1087.037	28	38.823	
	รวม	6511.521	34		
สีเหลือง	ระหว่างกลุ่ม	4442.381	6	740.397	68.146*
(Sumifix HF Yellow 3R Gran)	ภายในกลุ่ม	304.217	28	10.865	
	รวม	4746.599	34		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 4.3.1 ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแมกนีเซียมต่าง ๆ

ผลจากตารางที่ 4.3.1 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$) และจากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้วิธีของเชฟเฟ่ ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 20ก – 23ก โดยมีผลทดสอบดังนี้

- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียม 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีแดง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียม 10.00, 20.00 และ 30.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($P<0.05$)
- ผ้าที่ย้อมสีเหลือง พบว่าทุกปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมมีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.3.1 และผลการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ ด้วยวิธีของเชฟเฟ่ แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้า ขึ้นกับปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อม และเฉดของสีย้อมที่ใช้ โดยค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมมากขึ้น สีแดงให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีสูงที่สุด รองลงมาเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงินตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3.1 ซึ่งจากผลการทดลอง เมื่อย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอทีฟสีน้ำเงิน ควรมีปริมาณแมกนีเซียมในน้ำ

ย้อมอยู่ในช่วง 0.00 – 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณ 0.00 – 30.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมด้วยสีแดง และน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมสีเหลือง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานจริง จึงแนะนำว่าการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ ในทุกเฉดสีควรมีปริมาณแมกนีเซียมในน้ำไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2 ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อความแตกต่างของสีบนผ้า

วัดความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วย สีน้ำเงิน แดง และเหลือง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน โดยนำผ้าที่ผ่านการย้อมมาวัดค่า L*, a*, b* ด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 4ข – 6ข และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมกนีเซียมและค่า L*, a*, b* ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3.2

ตารางที่ 4.3.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าความแตกต่างของสี ของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน

ชนิดสี	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมกับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
สีน้ำเงิน	CIE L	7	-0.866*
	CIE a	7	-0.849**
	CIE b	7	0.895*
สีแดง	CIE L	7	-0.863**
	CIE a	7	-0.297
	CIE b	7	-0.744**
สีเหลือง	CIE L	7	-0.924**
	CIE a	7	0.222
	CIE b	7	0.076

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.3.2 แสดงว่า เมื่อปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมมากขึ้น ทำให้ผ้าย้อมมีความแตกต่างของสีต่างกัน ดังนี้

ผ้ามีความสว่างของสีลดลง อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)

ผ้าย้อมสีน้ำเงิน มีสีออกไปทางเขียวมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)

- ผ้าย้อมสีแดง มีสีออกไปทางน้ำเงินมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีเหลือง เมื่อน้ำย้อมมีปริมาณแมกนีเซียมมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงเฉดสีไม่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติ

4.3.3 ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความคงทนของผ้าต่อการซัก

ศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยวิธีตามมาตรฐาน ISO 105 - C06 :1994(E) ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 2ค นำผ้าที่ผ่านการซัก มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าระดับความเข้มสีที่ลดลง กับปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อม ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3.3

ตารางที่ 4.3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าการลดลงของระดับความเข้มสี หลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม กับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
การลดลงของสีน้ำเงินหลังการซัก	7	0.976**
การลดลงของสีแดงหลังการซัก	7	0.927**
การลดลงของสีเหลืองหลังการซัก	7	0.931**

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.3.3 แสดงว่า ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของระดับความเข้มสีของผ้าภายหลังการซัก กล่าวคือ เมื่อปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมมากขึ้น ระดับความเข้มสีหลังการซักจะลดลงมากตามไปด้วย แสดงว่า ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อมมีผลให้ผ้ามีความคงทนของสีต่อการซักลดลง

4.4 ผลของปริมาณเหล็กในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

นำผ้าฝ้ายถักมาย้อมด้วยสีรีแอคทีฟด้วยสีน้ำเงิน(Sumifix HF Blue 2R Gran) สีแดง (Sumifix HF Red G Gran) และสีเหลือง(Sumifix HF Yellow 3R Gran) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ด้วยน้ำที่มีปริมาณเหล็ก 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับการย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน

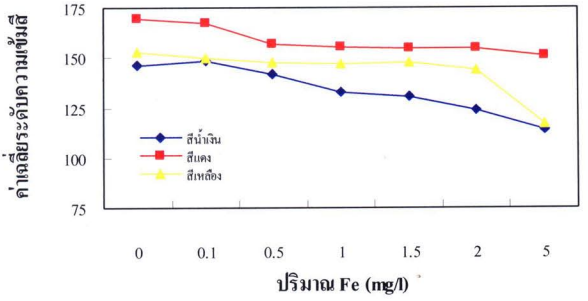
4.4.1 ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าระดับความเข้มของสี(color yield, K/S) บนผ้า

นำผ้าที่ผ่านการย้อม มาวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ได้ค่าผลรวมระดับความเข้มของสี(color yield, K/S) ตามตารางผนวกที่ 7ก – 9ก นำค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมในปริมาณเหล็กต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบว่าปริมาณเหล็กในน้ำย้อมต่างกัน ทำให้ระดับความเข้มของสีบนผ้าต่างกันหรือไม่ ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.4.1 และรูปที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.4.1 การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

ชนิดของสีย้อม	แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
สีน้ำเงิน	ระหว่างกลุ่ม	4683.909	6	780.651	63.584*
(Sumifix HF Blue 2R Gran)	ภายในกลุ่ม	343.769	28	12.277	
	รวม	5027.678	34		
สีแดง	ระหว่างกลุ่ม	1529.794	6	254.966	41.268*
(Sumifix HF Red G Gran)	ภายในกลุ่ม	172.993	28	6.178	
	รวม	1702.787	34		
สีเหลือง	ระหว่างกลุ่ม	4515.597	6	752.599	70.234*
(Sumifix HF Yellow 3R Gran)	ภายในกลุ่ม	300.036	28	10.716	
	รวม	4815.633	34		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 4.4.1 ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณเหล็กต่าง ๆ

ผลจากตารางที่ 4.4.1 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณเหล็กต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$) และจากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้วิธีของเชฟเฟ่ ได้ผลแสดงในตารางผนวก ที่ 24ก – 27ก โดยมีผลทดสอบ ดังนี้

- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน ในน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็ก 0.10 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีแดง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็ก 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีเหลือง พบว่าทุกปริมาณเหล็กในน้ำย้อมมีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.4.1 และ ผลการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ ด้วยวิธีของเชฟเฟ่ แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าขึ้นกับปริมาณเหล็กในน้ำย้อม และเฉดของสีย้อมที่ใช้ โดยค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสี มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเหล็กในน้ำย้อมมากขึ้น สีแดงให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีสูงที่สุด รองลงมาเป็นสีเหลือง และสีน้ำเงินตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4.1 ซึ่งจากผลการทดลอง เมื่อย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำเงิน ควรมีปริมาณเหล็กในน้ำย้อมอยู่ในช่วง 0.00 – 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณเหล็ก 0.00 – 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมด้วย

สีแดง และ 0.00 - 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมสีเหลือง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานจริง จึงแนะนำว่าการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ ในทุกเฉดสี ควรมีปริมาณเหล็กในน้ำไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4.2 ปริมาณเหล็กในน้ำต่อความแตกต่างของสี

วัดความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วย สีน้ำเงิน แดง และเหลืองด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน โดยนำผ้าที่ผ่านการย้อม มาวัดค่า L*, a*, b* ด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 7ข – 9ข และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ เหล็ก และค่า L*, a*, b* ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.4.2

ตารางที่ 4.4.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าความแตกต่างของสีของผ้า ที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

ชนิดสี	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมกับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
สีน้ำเงิน	CIE L	7	-0.878**
	CIE a	7	-0.666**
	CIE b	7	0.677**
สีแดง	CIE L	7	-0.942**
	CIE a	7	0.179
	CIE b	7	0.380*
สีเหลือง	CIE L	7	-0.907**
	CIE a	7	0.263
	CIE b	7	0.582**

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.4.2 แสดงว่า เมื่อปริมาณเหล็กในน้ำย้อมมากขึ้น ทำให้ผ้าย้อมมีความแตกต่างของสีต่างกัน ดังนี้

- ผ้ามีความสว่างของสีลดลง อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.01$)
- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน มีสีออกไปทางเขียวมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.01$)

- ผ้าย้อมสีแดง มีสีออกไปทางเหลืองมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีเหลือง มีสีออกไปทางเหลืองมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

4.4.3 ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความคงทนของผ้าต่อการซัก

ศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยวิธีตามมาตรฐาน ISO 105-C06 :1994(E) ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 3ค โดยนำผ้าที่ผ่านการซัก มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความเข้มสีที่ลดลง กับปริมาณเหล็กในน้ำย้อม ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.4.3

ตารางที่ 4.4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าการลดลง ของระดับความเข้มสี หลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม กับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
การลดลงของสีน้ำเงินหลังการซัก	7	0.806*
การลดลงของสีแดงหลังการซัก	7	0.894**
การลดลงของสีเหลืองหลังการซัก	7	0.908**

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.4.3 แสดงว่า ปริมาณเหล็กในน้ำย้อม มีความสัมพันธ์โดยตรง กับการลดลงของระดับความเข้มสีของผ้าภายหลังการซัก กล่าวคือ เมื่อปริมาณเหล็กในน้ำย้อมมากขึ้น ระดับความเข้มสีหลังการซักจะลดลงมากตามไปด้วย แสดงว่า ปริมาณเหล็กในน้ำย้อมมีผลให้ผ้ามีความคงทนของสีต่อการซักลดลง

4.5 ผลของปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายฟอกด้วยสีรีแอคทีฟ

นำผ้าฝ้ายฟอกมาย้อมด้วยสีรีแอคทีฟด้วยสีน้ำเงิน(Sumifix HF Blue 2R Gran) สีแดง (Sumifix HF Red G Gran) และสีเหลือง(Sumifix HF Yellow 3R Gran) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีส 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับการย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยแต่ละสีทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

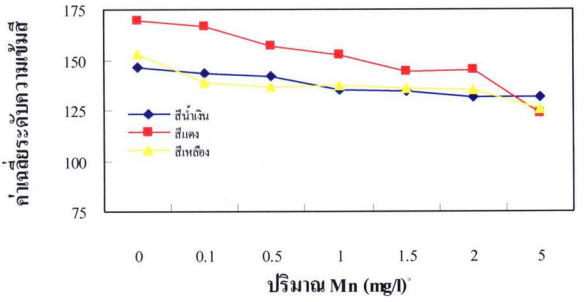
4.5.1 ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อระดับความเข้มสี(color yield, K/S) บนผ้า

นำผ้าที่ผ่านการย้อม มาวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ค่าผลรวมระดับความเข้มสี(color yield, K/S) ตามตารางผนวกที่ 10ก – 12ก นำค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบ ว่าปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมต่างกันมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มของสีบนผ้าต่างกันหรือไม่ ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.5.1 และรูปที่ 4.5.1

ตารางที่ 4.5.1 การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน

ชนิดของสีย้อม	แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
สีน้ำเงิน	ระหว่างกลุ่ม	753.308	6	125.551	2.482*
(Sumifix HF Blue 2R Gran)	ภายในกลุ่ม	1416.597	28	50.593	
	รวม	2169.905	34		
สีแดง	ระหว่างกลุ่ม	7311.094	6	1218.516	177.907*
(Sumifix HF Red G Gran)	ภายในกลุ่ม	191.777	28	6.849	
	รวม	7502.871	34		
สีเหลือง	ระหว่างกลุ่ม	1937.092	6	322.849	46.851*
(Sumifix HF Yellow 3R Gran)	ภายในกลุ่ม	192.946	28	6.891	
	รวม	2130.037	34		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 4.5.1 ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณแมงกานีสต่างๆ

ผลจากตารางที่ 4.5.1 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสี บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$) และจากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้วิธีของเชฟเฟ่ ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 28ก - 31ก โดยมีผลทดสอบดังนี้

- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีส 0.10 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีแดง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีส 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีเหลือง พบว่าทุกปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมมีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.5.1 และผลการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ด้วยวิธีของเชฟเฟ่ แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้า ขึ้นกับปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อม และเฉดของสีย้อม โดยค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมเพิ่มขึ้น สีแดงให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีสูงที่สุด ส่วนสีน้ำเงิน และสีเหลืองให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5.1 ซึ่งจากผลการทดลอง เมื่อย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอทีฟสีน้ำเงิน ควรมีปริมาณ

แมงกานีสในน้ำย้อมอยู่ในช่วง 0.00 – 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแมงกานีส 0.00 – 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมด้วยสีแดง และ ปริมาณแมงกานีสน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมด้วยสีเหลือง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานจริง จึงแนะนำว่าการย้อมผ้าฝ้ายฉีกด้วยสีรีแอคทีฟ ในทุกเฉดสี ควรมีปริมาณแมงกานีสในน้ำไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.5.2 ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อความแตกต่างของสี

วัดความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วย สีน้ำเงิน แดง และเหลือง ด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน โดยนำผ้าที่ผ่านการย้อมมาวัดค่า L*, a*, b* ด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 10ข - 12ข นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีส และค่า L*, a*, b* ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.5.2

ตารางที่ 4.5.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าความแตกต่างของสี ของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน

ชนิดสี	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมกับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
สีน้ำเงิน	CIE L	7	-0.908**
	CIE a	7	-0.450
	CIE b	7	0.620**
สีแดง	CIE L	7	-0.868**
	CIE a	7	-0.776*
	CIE b	7	0.280
สีเหลือง	CIE L	7	-0.784**
	CIE a	7	-0.261
	CIE b	7	-0.177

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.5.2 แสดงว่า เมื่อน้ำย้อมมีปริมาณแมงกานีมากขึ้น ทำให้ผ้าย้อม มีความแตกต่างของสีต่างกัน ดังนี้

- ผ้ามีความสว่างของสีลดลง อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)
- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน มีสีออกไปทางเหลืองมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)

ผ้าย้อมสีแดง มีสีออกไปทางเขียวมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

ผ้าย้อมสีเหลือง เมื่อน้ำย้อมมีปริมาณแมงกานีสมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงเฉดสีไม่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติ

4.5.3 ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความคงทนของผ้าต่อการซัก

ศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้าง ด้วยวิธีตามมาตรฐาน ISO 105-C06 :1994(E) ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 4ค นำผ้าที่ผ่านการซัก มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าระดับความเข้มสีที่ลดลง กับปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อม ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.5.3

ตารางที่ 4.5.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าการลดลง ของระดับความเข้มสี หลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อม กับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
การลดลงของสีน้ำเงินหลังการซัก	7	0.889**
การลดลงของสีแดงหลังการซัก	7	0.961**
การลดลงของสีเหลืองหลังการซัก	7	0.863*

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.5.3 แสดงว่า ปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมมีความสัมพันธ์โดยตรง กับการลดลงของระดับความเข้มสีของผ้าภายหลังการซัก กล่าวคือ เมื่อปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมมากขึ้น ระดับความเข้มสีหลังการซักจะลดลงมากตามไปด้วย แสดงว่า ปริมาณแมงกานีสในน้ำย้อมมีผลให้ผ้ามีความคงทนของสีต่อการซักลดลง

4.6 ผลของปริมาณทองแดงในน้ำต่อกระบวนการฟอกผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

นำผ้าฝ้ายถักมาย้อมด้วยสีรีแอคทีฟด้วยสีน้ำเงิน(Sumifix HF Blue 2R Gran) สีแดง (Sumifix HF Red G Gran) และสีเหลือง(Sumifix HF Yellow 3R Gran) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดง 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับการย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยแต่ละสีทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

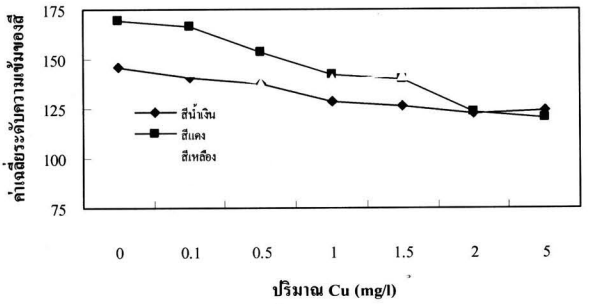
4.6.1 ปริมาณทองแดงในน้ำต่อระดับความเข้มสี(color yield, K/S) บนผ้า

นำผ้าที่ผ่านการย้อม มาวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ได้ผลรวมระดับความเข้มสี(color yield, K/S) ตามตารางผนวกที่ 13ก – 15ก นำค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วย น้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบว่า ปริมาณทองแดงในน้ำย้อมต่างกัน มีผลทำให้ระดับความเข้มของสีบนผ้าต่างกันหรือไม่ ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.6.1 และรูปที่ 4.6.1

ตารางที่ 4.6.1 การทดสอบระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน

ชนิดของสีย้อม	แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
สีน้ำเงิน	ระหว่างกลุ่ม	2623.284	6	437.214	36.211*
(Sumifix HF Blue 2R Gran)	ภายในกลุ่ม	337.979	28	12.071	
	รวม	2961.263	34		
สีแดง	ระหว่างกลุ่ม	11173.794	6	1862.299	218.680*
(Sumifix HF Red G Gran)	ภายในกลุ่ม	238.450	28	8.516	
	รวม	11412.244	34		
สีเหลือง	ระหว่างกลุ่ม	1096.802	6	182.800	11.723*
(Sumifix HF Yellow 3R Gran)	ภายในกลุ่ม	436.626	28	15.594	
	รวม	1533.428	34		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 4.6.1 ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำในปริมาณทองแดงต่าง ๆ

ผลจากตารางที่ 4.6.1 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$) และจากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้วิธีของเชฟเฟ่ ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 32 ก- 35ก โดยมีผลทดสอบดังนี้

- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน ในน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดง 0.10 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออนส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)
- ผ้าย้อมสีแดง และสีเหลือง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดง 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ กับจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วนปริมาณอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีแตกต่างจากผ้าที่ย้อมด้วยน้ำปราศจากไอออน อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.05$)

จากตารางที่ 4.6.1 และผลการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ ด้วยวิธีของเชฟเฟ่ แสดงว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีบนผ้า ขึ้นกับปริมาณทองแดงในน้ำย้อม และเฉดของสีย้อม โดยค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณทองแดงในน้ำย้อมเพิ่มขึ้น สีแดงให้ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีสูงที่สุด แต่เมื่อปริมาณทองแดงในน้ำเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มสีในแต่ละเฉดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6.1 ซึ่งจากผลการทดลอง เมื่อย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอทีฟสีน้ำเงิน ควรมีปริมาณทองแดงในน้ำย้อมอยู่ในช่วง 0.00 – 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ปริมาณแมงกานีสน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อย้อมด้วยสีแดงและสีเหลือง ดังนั้นเพื่อความสะดวกใน

การใช้งาน จึงแนะนำว่าในการย้อมสีผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ ควรมีปริมาณทองแดงในน้ำไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6.2 ปริมาณทองแดงในน้ำต่อความแตกต่างของสี

วัดความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วย สีน้ำเงิน แดง และเหลือง ด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน โดยนำผ้าที่ผ่านการย้อมมาวัดค่า L*, a*, b* ด้วยเครื่อง reflectance spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 13ข - 15ข นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงและค่า L*, a*, b* ได้ผลตารางที่ 4.6.2

ตารางที่ 4.6.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าความแตกต่างของสี ของผ้า ที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน

ชนิดสี	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อมกับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
สีน้ำเงิน	CIE L	7	-0.798**
	CIE a	7	0.127
	CIE b	7	0.150
สีแดง	CIE L	7	-0.846**
	CIE a	7	-0.988**
	CIE b	7	-0.854**
สีเหลือง	CIE L	7	-0.895**
	CIE a	7	-0.100
	CIE b	7	0.312

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.6.2 แสดงว่า เมื่อน้ำย้อมมีมีปริมาณทองแดงมากขึ้น ทำให้ผ้าย้อมมีความแตกต่างของสีต่างกัน ดังนี้

- ผ้ามีความสว่างของสีลดลง อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)
- ผ้าย้อมสีน้ำเงิน และสีเหลือง ในน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงเฉดสีไม่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติ
- ผ้าย้อมสีแดง มีสีออกไปทางน้ำเงิน และเขียวมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ($P<0.01$)

4.6.3 ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความคงทนของผ้าต่อการซัก

ศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้างด้วยวิธีตามมาตรฐาน ISO 105 - C06 :1994(E) ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ 5ค นำผ้าที่ผ่านการซัก มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความเข้มสีที่ลดลง กับปริมาณทองแดงในน้ำย้อม ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.6.3

ตารางที่ 4.6.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างค่าการลดลงของ ระดับความเข้มสี หลังการซักของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม กับ	จำนวนข้อมูล (n)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
การลดลงของสีน้ำเงินหลังการซัก	7	0.731
การลดลงของสีแดงหลังการซัก	7	0.978**
การลดลงของสีเหลืองหลังการซัก	7	0.775*

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ผลจากตารางที่ 4.6.3 แสดงว่า ปริมาณทองแดงในน้ำย้อม มีความสัมพันธ์โดยตรง กับการลดลงของระดับความเข้มสีของผ้าภายหลังการซัก กล่าวคือ เมื่อปริมาณทองแดงในน้ำย้อมมากขึ้น ระดับความเข้มสีหลังการซักจะลดลงมากตามไปด้วย แสดงว่า ปริมาณทองแดงในน้ำย้อมมีผลให้ผ้ามีความคงทนของสีต่อการซักลดลง

บทที่ 5

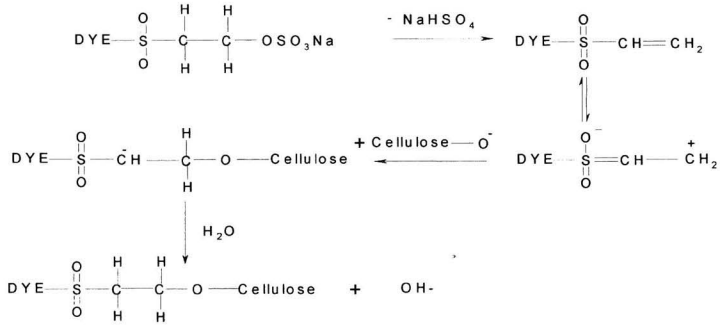
สรุปผลการทดลอง

5.1 ชนิดและปริมาณโลหะในผ้าฝ้ายถัก

ผ้าฝ้ายถัก ที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ มีการปนเปื้อนของเหล็ก แมงกานีส แคลเซียม และแมกนีเซียม ตามธรรมชาติ เนื่องจากการดูดซับโลหะเหล่านี้จากดิน โดยในเส้นใยฝ้ายที่นำมาทดลองมีการปนเปื้อนของ เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส ในปริมาณ 35.68, 34.60, 7.00 และ 1.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทำให้ผ้าฝ้ายที่ใช้ฝ้ายจากแหล่งต่างกัน มีสมบัติต่างกันด้วย ซึ่ง D.T. Parkers, 2005. รายงานว่าการปนเปื้อนของโลหะในผ้าฝ้ายเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพการย้อมสิ่งทอ

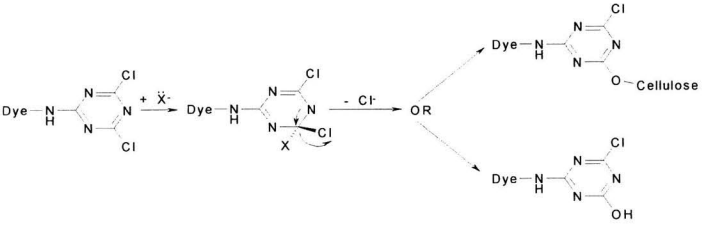
5.2 ผลของโลหะในน้ำต่อคุณภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ

ในการระบวนการย้อมปัญหาหลักที่สำคัญคือ ผลิตภัณฑ์ไม่มีคุณภาพ เช่น เฉดสี ความสม่ำเสมอของสี และความคงทนของสีต่อภาวะต่าง ๆ ไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า จึงมีการพัฒนาสีย้อม ที่สามารถยึดติดกับเส้นใยได้ดี ในการทดลองนี้ สีรีแอคทีฟที่นำมาทดลอง เป็นสี Sumifix HF ของ บริษัทซูมิโตโม ซึ่งเป็นสีที่พัฒนาขึ้นให้มีกลุ่มทำปฏิกิริยาหลายกลุ่ม (multifunctional reactive dyes) ประกอบด้วยกลุ่มไวนิลซัลโฟน(vinyl sulphone) และกลุ่มโมโนคลอโรไตรเอซีน(monochlorotriazine) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะทางเคมี กับเส้นใยทั้งแบบปฏิกิริยาการเติม(addition reaction) และปฏิกิริยาแทนที่(substitution reaction) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.1 ปฏิกิริยาการเติม(addition reaction) ระหว่างกลุ่มไวนิลซัลโฟน ของสีรีแอคทีฟกับกลุ่มไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส

ที่มา : M. Clark., 2005.



รูปที่ 5.2 ปฏิกิริยาการแทนที่(substituitionition reaction) ระหว่างกลุ่มโมโนคลอโนไตรเอซีนของสีรีแอคทีฟกับกลุ่มไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส

ที่มา : M. Clark., 2005.

จากการที่สีรีแอคทีฟ มีกลุ่มทำปฏิกิริยาหลายกลุ่ม ทำให้เพิ่มความสามารถของสี ในการทำปฏิกิริยากับเส้นใย สีติดกับเส้นใยได้ดีขึ้น มีสีตกค้างในน้ำทิ้งลดลง ใช้สารเคมีช่วยย้อมต่าง ๆ ลดลง สีย้อมที่ได้มีความคงทนในภาวะต่าง ๆ และให้ผลการผลิตซ้ำที่เหมือนเดิม(F. Douthwaite, 2007) อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง พบว่า น้ำเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่ง ที่กำหนดคุณภาพการย้อมผ้าฝ้ายถักด้วยสีรีแอคทีฟ แม้ว่าจะเลือกใช้สีที่มีคุณภาพดี แต่หากน้ำที่นำมาย้อมมีคุณภาพไม่เหมาะสม มีการปนเปื้อนของโลหะประเภท เหล็ก แมงกานีส ทองแดง แคลเซียม และแมกนีเซียม จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของการย้อม ในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

(1) ผ้าย้อมมีระดับความเข้มสี ลดลง สาเหตุอาจเกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างส่วนโครงสร้างของโครโมฟอร์(chromophore) ของโมเลกุลสีย้อม กับไอออนของโลหะ ทำให้สีย้อม ตกตะกอน ปริมาณของสีที่ไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยลดลง ทำให้ระดับความเข้มสีบนผ้าลดลง นอกจากนี้ D.T. Parker., 2005 พบว่าตะกอนของสี ทำให้เกิดรอยเปื้อนบนผ้า และเครื่องจักรซึ่งกำจัดออกได้ยาก และทำให้สิ้นเปลืองสีในการย้อมมากขึ้น

(2) ผ้าย้อมมีสีทึมลง สีผิดเพี้ยนไปตามชนิดของโลหะ และปริมาณของโลหะ เนื่องจากโครงสร้างส่วนโครโมฟอร์ ซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงที่มองเห็นได้ ทำให้เห็นเป็นสีต่าง ๆ เมื่อเกิดปฏิกิริยากับโลหะต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสี ทำให้ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงขึ้น – ต่ำลง หรือปริมาณการดูดกลืนเปลี่ยนไป ทำให้สีย้อมที่ปรากฏ ไม่ตรงกับความต้องการ

(3) ความคงทนของสีต่อการซักต่ำลง ซึ่งอาจเกิดจากโมเลกุลของสีย้อมเมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะ แล้วเกิดเป็นตะกอน ตะกอนเหล่านี้ มีขนาดเล็ก และปนเปื้อนอยู่ที่ผิวของผ้า อาจทำให้ความแข็งแรงของพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใยลดลง มีผลให้ความคงทนของสีต่อสภาวะต่าง ๆ ลดลง

5.3 ปริมาณของโลหะในน้ำที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย้อมผ้าฝ้ายอัก

ในการย้อมผ้าฝ้ายอัก เพื่อให้ได้คุณภาพการย้อมที่ดี ได้สีตรงตามความต้องการ มีความสม่ำเสมอ สามารถย้อมซ้ำได้สีที่เหมือนเดิม และผ้าย้อมที่ได้มีความคงทน จำเป็นต้องการควบคุมคุณภาพน้ำให้เหมาะสม และคงที่ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ตลอดเวลา โดยปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียม ในน้ำ ควรต่ำกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณเหล็ก แมงกานีส ทองแดง ควรต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.4 ตัวแปรอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพการย้อม

การย้อมที่ให้ได้คุณภาพที่ดี นอกจากขึ้นกับคุณภาพของผ้า ชนิดสีย้อม คุณภาพน้ำ ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องระมัดระวัง ได้แก่

- ขั้นตอนการย้อม ลำดับ และ อัตราในการเติมสี และสารเคมี
- ปริมาณน้ำที่ใช้
- พีเอชของน้ำย้อม
- อุณหภูมิ เวลา และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (temperature profile)
- และอื่นๆ เช่น ความถ่วงจำเพาะ

5.5 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการย้อม ของสีชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะกลุ่มสีที่นิยมใช้ในกลุ่มหัตถกรรมสิ่งทอพื้นบ้าน เพื่อลดการย้อมซ้ำ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ สามารถสร้างผลประโยชน์ สร้างรายได้ รักษาความมั่นคงของสังคม และวัฒนธรรม ตลอดจนรักษาต้นทุนทางสิ่งแวดล้อมไว้ได้ โดยไม่มีผลกระทบทางลบต่อความต้องการของคนรุ่นต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม.** สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน.

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2547. **คู่มือเทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ.** กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โพรเซสคัลเลอร์ ดีไซน์ แอนด์ พริ้นติ้ง.

เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล. 2537. **การควบคุมคุณภาพงานเตรียมสิ่งทอเพื่อการย้อม พิมพ์.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ประชาชน.

ณรงค์ วุทธิเสถียร. 2540. **การปรับสภาพน้ำใช้อุตสาหกรรม.** กรุงเทพฯ: สมาคมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2541. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.** พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

C. B. Smith. 2003. **Identification and Reduction of Pollution Soyrces in Textile Wet Processing.** Department of Textile Chemistry. North Carolina State University.

C.N. Sawer., P.L. Mccarty., and G.F. Perkin. 2003. **Chemistry for environmental engineering and science.** 5th. U.S.A.: Mc Graw-Hill.

D.T. Parkers. 2005. **Critical Success Factors in Improving Dyehouse Productivity. Dye house solution International.** Conference, Istanbul May 2005.

F. Douthwaite. 2007. **Sumifix HF : A Novel Series of Reactive Dyes**. http://www.sumitomo-chemical.be/bu/dyestuffs_hf.htm July 15, 2007.

J.E. M0ck., and H.T. Jennings. 1996. **Water Quality and Laundary Problem.** North Carolina Extension Service. http://www.bae.ncsu.edu.

J.N. Eetters and M.D. Hurwitz. 1986. Opaque Reflectance of Translucent Fabric. **Textile Chemist and Colorist.** 18(6): 19-26.

J. Shore. 1995. **Cellulosic Dyeing.** Oxford: The Alden Press.

Jr., F. W. Billmeyer, and M. Saltzman. 1981. **Principles of Color Technology.** 2nd Edition. New York: Wiley.

J.W. Rucker., and C.B. Smith. 1995. **Trouble Shooting in Preparation Asystematic Approch.** Textile Chemistry Department. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.

K. Hunger. 2003. **Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications.** Germany:Wiley-VCH Verlag GMb & Co.

K.W. Yueng., and S.M. Shang. 1999. The Influence of metal ions on the Aggregation and Hudrophobicity of Dyes in Solutions. **Coloration Technology.** 115(7-8): 228-232.

M. Clark. 2005. **Reactive Dyes: Improve Dye Practices in the Textile Sector.** Department of Colour Chemistry. University of Leeds, Leeds, UK

N.Manivasakam. 1995. **Water used in textile processing.** Coimbature: Scroll EPD.

www.ncsu.edu./scivis/index.htm.. **Color Principle-Hue, Saturation, and Value.** July 1, 2007.

http//personales.upv.es. . July 1, 2007.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1ก ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	144.88	142.04	149.83	150.08	145.49
10	133.14	136.45	142.26	142.80	138.43
20	128.13	125.27	131.16	148.28	138.57
30	125.22	121.29	114.77	136.08	133.12
40	120.78	126.58	137.60	131.59	130.45
50	130.99	120.49	132.78	120.46	130.45
100	100.36	94.20	94.10	100.64	99.16

ตารางที่ 2ก ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	170.81	173.81	167.58	168.89	165.14
10	165.08	166.01	168.19	169.48	165.43
20	166.69	166.74	162.34	163.51	163.29
30	161.50	162.20	161.46	159.32	161.78
40	143.71	143.40	136.47	142.02	143.97
50	135.23	132.52	130.39	133.68	132.23
100	122.90	131.12	132.17	135.89	126.92

ตารางที่ 3ก ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ(Sumifix HF Yellow 3R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	148.22	151.33	158.21	154.91	152.70
10	126.58	126.28	128.09	128.24	114.81
20	125.59	126.42	121.24	127.32	132.91
30	120.67	122.53	118.07	123.66	122.00
40	126.96	121.78	120.63	128.73	121.90
50	119.59	121.68	120.05	122.74	123.77
100	93.84	92.25	93.83	94.19	95.99

ตารางที่ 4ก ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	144.88	142.04	149.83	150.08	145.49
10	150.57	146.15	136.65	138.99	143.59
20	141.06	140.10	134.04	133.98	130.87
30	120.58	128.77	124.56	120.64	119.36
40	115.11	109.99	108.27	104.55	104.50
50	97.39	97.19	93.88	100.32	100.46
100	93.84	93.01	84.58	101.75	101.73

ตารางที่ 5ก ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	170.81	173.81	167.58	169.89	165.14
10	169.99	166.01	168.19	169.48	165.43
20	166.69	142.43	159.26	161.88	163.24
30	158.28	149.68	158.22	145.85	162.79
40	160.31	158.71	156.12	144.06	161.62
50	144.95	149.35	154.15	160.63	161.01
100	121.81	127.02	129.27	132.54	132.17

ตารางที่ 6ก ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	148.22	151.33	158.21	154.91	152.70
10	141.09	139.31	141.33	138.68	146.28
20	142.20	149.99	141.24	143.60	143.11
30	137.57	137.66	138.23	144.16	136.43
40	129.61	136.01	133.49	138.05	137.81
50	122.89	127.72	125.88	125.04	122.26
100	117.67	112.53	118.07	113.66	122.00

ตารางที่ 7ก ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	144.88	142.04	149.83	150.08	145.49
0.1	149.44	151.15	149.82	143.45	147.69
0.5	137.56	139.12	139.54	149.54	144.43
1.0	139.48	134.33	130.56	130.21	130.81
1.5	132.38	129.81	132.92	126.07	130.19
2.0	128.31	126.65	120.03	124.83	121.26
5.0	118.14	112.83	113.06	113.63	112.14

ตารางที่ 8ก ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	170.81	173.81	167.58	169.89	165.14
0.1	168.59	166.01	168.19	169.48	165.43
0.5	156.69	155.14	153.30	159.82	158.13
1.0	156.73	159.73	153.88	152.94	152.33
1.5	151.20	151.91	155.98	158.64	155.95
2.0	153.98	152.01	156.43	154.84	156.59
5.0	150.17	151.27	150.72	150.11	151.04

ตารางที่ 9ก ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	148.22	151.33	158.21	154.91	152.70
0.1	150.70	149.80	150.62	148.16	152.38
0.5	148.98	152.90	145.92	142.94	147.77
1.0	148.64	148.60	151.23	146.03	141.79
1.5	148.02	153.13	147.69	146.27	144.63
2.0	143.42	149.10	141.84	144.46	143.46
5.0	117.67	112.53	118.07	113.66	122.00

ตารางที่ 10ก ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	144.88	142.04	149.83	150.08	145.49
0.1	141.96	140.01	138.51	149.33	150.25
0.5	133.51	140.01	160.46	149.29	131.79
1.0	135.96	139.19	133.81	149.60	130.06
1.5	132.96	139.18	133.46	148.76	127.93
2.0	127.77	143.91	133.69	130.86	131.50
5.0	132.02	131.97	134.23	134.81	141.21

ตารางที่ 11ก ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	170.81	173.81	167.58	169.89	165.14
0.1	164.92	166.01	168.19	169.48	165.43
0.5	156.69	159.37	157.60	153.47	156.64
1.0	150.22	151.36	155.16	150.90	156.24
1.5	143.84	148.02	145.46	140.96	143.06
2.0	142.72	145.54	146.03	146.00	144.72
5.0	123.84	129.13	120.50	120.54	123.47

ตารางที่ 12ก ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	148.22	151.33	158.21	154.91	152.70
0.1	139.80	141.24	138.25	133.80	143.09
0.5	139.20	135.58	135.13	137.36	138.58
1.0	135.42	136.01	139.07	136.52	139.97
1.5	135.04	137.18	138.75	134.92	134.64
2.0	136.24	137.96	135.24	135.37	131.22
5.0	128.03	128.30	123.49	125.80	123.81

ตารางที่ 13ก ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	144.88	142.04	149.83	150.08	145.49
0.1	144.74	140.57	140.78	138.48	140.95
0.5	139.24	136.39	135.54	140.11	139.44
1.0	131.79	131.17	127.89	126.20	128.19
1.5	129.81	130.92	123.00	122.10	125.38
2.0	123.50	120.50	121.60	126.42	120.00
5.0	121.51	120.63	119.08	133.85	125.30

ตารางที่ 14ก ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	170.81	173.81	167.58	169.89	165.14
0.1	162.70	166.01	168.19	169.48	165.43
0.5	156.69	150.74	151.61	154.71	156.40
1.0	144.87	144.16	141.31	137.81	144.78
1.5	140.61	135.02	142.06	143.76	140.50
2.0	122.54	121.65	127.68	123.39	122.34
5.0	121.96	120.26	115.17	122.07	121.93

ตารางที่ 15ก ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความเข้มสีบนผ้าเมื่อย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran)

ความเข้มข้น	จำนวนครั้งของการย้อม				
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	1	2	3	4	5
0	148.22	151.33	158.21	154.91	152.70
0.1	143.23	146.20	145.39	148.95	137.35
0.5	134.45	134.55	140.46	139.77	141.78
1.0	142.77	143.02	142.05	143.60	130.98
1.5	141.26	139.55	145.42	144.74	137.45
2.0	137.68	145.83	140.16	137.64	133.56
5.0	136.79	133.51	133.19	131.39	134.00

ตารางที่ 16ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน

	0.00(mg/l) (146.464)	10.00(mg/l) (138.616)	20.00(mg/l) (134.282)	40.00(mg/l) (129.400)	50.00(mg/l) (127.034)	30.00(mg/l) (126.096)	100.00(mg/l) (128.512)
0.00 (mg/l) (146.464)	-	7.848	12.812	17.064*	19.430*	20.368*	48.772*
10.00(mg/l) (138.616)	-	-	4.334	9.216	11.582	12.520	40.924*
20.00(mg/l) (134.282)	-	-	-	4.882	7.248	8.186	36.590*
40.00(mg/l) (129.400)	-	-	-	-	2.366	3.304	31.708*
50.00(mg/l) (127.034)	-	-	-	-	-	0.938	29.342*
30.00(mg/l) (126.096)	-	-	-	-	-	-	28.404*
100.00(mg/l) (128.512)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 17ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน

	0.00(mg/l) (169.446)	10.00(mg/l) (166.838)	20.00(mg/l) (164.514)	30.00(mg/l) (161.252)	40.00(mg/l) (141.914)	50.00(mg/l) (132.810)	100.00(mg/l) (129.800)
0.00(mg/l) (169.446)	-	2.608	4.932	8.194*	27.532*	36.636*	39.646*
10.00(mg/l) (166.838)	-	-	2.324	5.586	24.924*	34.028*	37.038*
20.00(mg/l) (164.514)	-	-	-	3.262	22.600*	31.704*	34.714*
30.00(mg/l) (161.252)	-	-	-	-	19.338*	28.442*	31.452*
40.00(mg/l) (141.914)	-	-	-	-	-	9.104*	12.114*
50.00(mg/l) (132.810)	-	-	-	-	-	-	3.0100
100.00(mg/l) (129.800)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 18ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน

	0.00(mg/l) (153.074)	20.00(mg/l) (126.696)	10.00(mg/l) (124.800)	40.00(mg/l) (124.000)	50.00(mg/l) (121.5666)	30.00(mg/l) (121.386)	100.00(mg/l) (94.020)
0.00(mg/l) (153.074)	-	26.378*	28.274*	29.074*	31.508*	31.688*	59.054*
20.00(mg/l) (126.696)	-	-	1.896	2.696	5.130	5.310	32.676*
10.00(mg/l) (124.800)	-	-	-	0.800	3.234	3.414	30.780*
40.00(mg/l) (124.000)	-	-	-	-	2.434	2.614	29.980*
50.00(mg/l) (121.5666)	-	-	-	-	-	0.180	27.546*
30.00(mg/l) (121.386)	-	-	-	-	-	-	27.366*
100.00(mg/l) (94.020)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 19ก ความเข้มเฉลี่ยสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแคลเซียมต่างๆ

ปริมาณแคลเซียมในน้ำย้อม	ชนิดของสีย้อม		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	146.46	169.45	153.07
10.00	138.62	166.84	124.80
20.00	134.28	164.51	126.70
30.00	126.10	161.25	121.39
40.00	129.40	141.91	124.00
50.00	127.03	132.81	121.57
100.00	97.69	129.80	94.02

ตารางที่ 20ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน

	0.00(mg/l) (146.464)	10.00(mg/l) (143.190)	20.00(mg/l) (136.010)	30.00(mg/l) (122.782)	40.00(mg/l) (108.484)	50.00(mg/l) (97.848)	100.00(mg/l) (94.982)
0.00(mg/l) (146.464)	-	3.274	10.454	23.682*	37.980*	48.616*	51.482*
10.00(mg/l) (143.190)	-	-	7.180	20.408*	34.706*	45.342*	48.208*
20.00(mg/l) (136.010)	-	-	-	13.228*	27.526*	38.162*	41.028*
30.00(mg/l) (122.782)	-	-	-	-	14.298*	24.934*	27.800*
40.00(mg/l) (108.484)	-	-	-	-	-	10.636	13.502*
50.00(mg/l) (97.848)	-	-	-	-	-	-	2.866
100.00(mg/l) (94.982)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 21ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน

	0.00(mg/l) (169.446)	10.00(mg/l) (167.820)	20.00(mg/l) (158.700)	40.00(mg/l) (156.164)	30.00(mg/l) (154.964)	50.00(mg/l) (154.018)	100.00(mg/l) (128.562)
0.00(mg/l) (169.446)	-	1.626	10.746	113.282	14.482	15.428*	40.884*
10.00(mg/l) (167.820)	-	-	9.120	11.656	12.856	13.802	39.258*
20.00(mg/l) (158.700)	-	-	-	2.536	3.736	4.682	30.138*
40.00(mg/l) (156.164)	-	-	-	-	1.200	2.146	27.602*
30.00(mg/l) (154.964)	-	-	-	-	-	0.946	26.402*
50.00(mg/l) (154.018)	-	-	-	-	-	-	25.4456*
100.00(mg/l) (128.562)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 22ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน

	0.00(mg/l) (153.074)	20.00(mg/l) (144.028)	10.00(mg/l) (141.338)	30.00(mg/l) (138.810)	40.00(mg/l) (134.994)	50.00(mg/l) (124.758)	100.00(mg/l) (116.786)
0.00(mg/l) (153.074)	-	9.046*	11.736*	14.264*	18.080*	28.316*	36.288*
20.00(mg/l) (144.028)	-	-	2.690	5.218	9.034*	19.270*	27.242*
10.00(mg/l) (141.338)	-	-	-	2.528	6.344	16.580*	24.552*
30.00(mg/l) (138.810)	-	-	-	-	3.316	14.052*	22.024*
40.00(mg/l) (134.994)	-	-	-	-	-	10.236*	18.208*
50.00(mg/l) (124.758)	-	-	-	-	-	-	7.972
100.00(mg/l) (116.786)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 23ก ความเข้มเฉลี่ยสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างๆ

ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อม	ชนิดของสีย้อม		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	146.46	169.45	153.07
10.00	143.19	167.82	141.34
20.00	136.01	158.70	144.03
30.00	122.78	154.96	138.81
40.00	108.48	156.16	134.99
50.00	97.85	154.02	124.76
100.00	94.98	128.56	116.79

ตารางที่ 24 ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

	0.10(mg/l) (148.310)	0.00(mg/l) (146.464)	0.50(mg/l) (142.038)	1.00(mg/l) (133.078)	1.50(mg/l) (130.274)	2.00(mg/l) (124.216)	5.00(mg/l) (113.960)
0.10(mg/l) (148.310)	-	1.846	6.272	15.232*	18.036*	24.094*	34.350*
0.00(mg/l) (146.464)	-	-	4.426	13.386*	16.190*	22.248*	32.504*
0.50(mg/l) (142.038)	-	-	-	8.960*	11.764*	17.822*	28.078*
1.00(mg/l) (133.078)	-	-	-	-	2.804	8.862*	19.118*
1.50(mg/l) (130.274)	-	-	-	-	-	6.058	16.314*
2.00(mg/l) (124.216)	-	-	-	-	-	-	10.256*
5.00(mg/l) (113.960)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 25 ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

	0.00(mg/l) (169.446)	0.10(mg/l) (167.540)	0.50(mg/l) (156.616)	1.00(mg/l) (155.122)	2.00(mg/l) (154.770)	1.50(mg/l) (154.736)	5.00(mg/l) (150.662)
0.00(mg/l) (169.446)	-	1.906	12.830*	14.324*	14.676*	14.710*	18.784*
0.10(mg/l) (167.540)	-	-	10.924*	12.418*	12.770*	12.804*	16.878*
0.50(mg/l) (156.616)	-	-	-	1.494	1.846	1.880	5.964
1.00(mg/l) (155.122)	-	-	-	-	0.352	0.386	4.460
2.00(mg/l) (154.770)	-	-	-	-	-	0.340	4.108
1.50(mg/l) (154.736)	-	-	-	-	-	-	4.074
5.00(mg/l) (150.662)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 26ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณเหล็กต่างกัน

	0.00(mg/l) (153.074)	0.10(mg/l) (150.332)	1.50(mg/l) (147.948)	0.50(mg/l) (147.702)	1.00(mg/l) (147.258)	2.00(mg/l) (144.456)	5.00(mg/l) (116.786)
0.00(mg/l) (153.074)	-	2.742	5.372	5.816	5.126	8.618*	36.288*
0.10(mg/l) (150.332)	-	-	2.384	2.630	3.074	5.876	33.546*
1.50(mg/l) (147.948)	-	-	-	0.246	0.690	3.492	31.162*
0.50(mg/l) (147.702)	-	-	-	-	0.440	3.246	30.916*
1.00(mg/l) (147.258)	-	-	-	-	-	2.802	30.472*
2.00(mg/l) (144.456)	-	-	-	-	-	-	27.670*
5.00(mg/l) (116.786)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 27ก ความเข้มเฉลี่ยสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณเหล็กต่างๆ

ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อม	ชนิดของสีย้อม		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	146.46	169.45	153.07
0.10	148.31	167.54	150.33
0.50	142.04	156.62	147.70
1.00	133.08	155.12	147.26
1.50	130.27	154.74	147.95
2.00	124.22	154.77	144.46
5.00	113.96	150.66	116.79

ตารางที่ 28 ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน

	0.00(mg/l) (146.464)	0.10(mg/l) (143.612)	0.50(mg/l) (142.212)	1.00(mg/l) (135.724)	1.50(mg/l) (134.458)	5.00(mg/l) (131.7660)	2.00(mg/l) (131.546)
0.00(mg/l) (146.464)	-	2.852	4.252	10.740*	12.006*	14.698*	14.918*
0.10(mg/l) (143.612)	-	-	1.400	7.888*	9.154*	11.846*	12.066*
0.50(mg/l) (142.212)	-	-	-	6.488	7.754*	10.446*	10.666*
1.00(mg/l) (135.724)	-	-	-	-	1.266	3.958	4.178
1.50(mg/l) (134.458)	-	-	-	-	-	2.692	2.912
5.00(mg/l) (131.7660)	-	-	-	-	-	-	0.220
2.00(mg/l) (131.546)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 29ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน

	0.00(mg/l) (169.446)	0.10(mg/l) (166.806)	0.50(mg/l) (156.754)	1.00(mg/l) (152.776)	2.00(mg/l) (145.002)	1.50(mg/l) (144.268)	5.00(mg/l) (123.524)
0.00(mg/l) (169.446)	-	2.640	12.692*	16.670*	24.440*	25.178*	45.922*
0.10(mg/l) (166.806)	-	-	10.052*	14.030*	21.804*	22.538*	43.282*
0.50(mg/l) (156.754)	-	-	-	3.978	11.752*	12.486*	33.230*
1.00(mg/l) (152.776)	-	-	-	-	7.774*	8.508*	29.252*
2.00(mg/l) (145.002)	-	-	-	-	-	0.734	21.478*
1.50(mg/l) (144.268)	-	-	-	-	-	-	20.744*
5.00(mg/l) (123.524)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 30ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสต่างกัน

	0.00(mg/l) (153.074)	0.10(mg/l) (139.236)	1.00(mg/l) (137.398)	0.50(mg/l) (137.170)	1.50(mg/l) (136.106)	2.00(mg/l) (135.206)	5.00(mg/l) (125.886)
0.00(mg/l) (153.074)	-	13.838*	15.676*	15.904*	16.968*	17.868*	27.188*
0.10(mg/l) (139.236)	-	-	1.838	2.066	3.130	4.030	13.350*
1.00(mg/l) (137.398)	-	-	-	0.228	1.292	2.192	11.512*
0.50(mg/l) (137.170)	-	-	-	-	1.064	1.964	11.284*
1.50(mg/l) (136.106)	-	-	-	-	-	0.900	10.220*
2.00(mg/l) (135.206)	-	-	-	-	-	-	9.320*
5.00(mg/l) (125.886)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 31ก ความเข้มเฉลี่ยสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณแมงกานีสต่างๆ

ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อม	ชนิดของสีย้อม		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	146.46	169.45	153.07
0.10	143.61	166.81	139.24
0.50	142.21	156.75	137.17
1.00	135.72	152.78	137.40
1.50	134.46	144.27	136.11
2.00	131.55	145.00	135.21
5.00	131.77	123.52	125.89

ตารางที่ 32ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Blue 2R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน

	0.00(mg/l) (146.464)	0.10(mg/l) (141.104)	0.50(mg/l) (138.124)	1.00(mg/l) (129.048)	1.50(mg/l) (126.242)	5.00(mg/l) (124.074)	2.00(mg/l) (122.404)
0.00 (mg/l) (146.464)	-	5.360	8.340	17.416*	20.222*	22.390*	24.060*
0.10(mg/l) (141.104)	-	-	2.980	12.056*	14.862*	17.030*	18.700*
0.50(mg/l) (138.124)	-	-	-	9.076*	11.882*	14.050*	15.720*
1.00(mg/l) (129.048)	-	-	-	-	2.806	4.974	6.644
1.50(mg/l) (126.242)	-	-	-	-	-	2.168	3.838
5.00(mg/l) (124.074)	-	-	-	-	-	-	1.670
2.00(mg/l) (122.404)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 33 ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Red G Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน

	0.00(mg/l) (169.446)	0.10(mg/l) (166.352)	0.50(mg/l) (154.030)	1.00(mg/l) (142.586)	1.50(mg/l) (140.390)	2.00(mg/l) (123.520)	5.00(mg/l) (120.278)
0.00(mg/l) (169.446)	-	3.084	15.416*	26.860*	29.050*	45.926*	49.168*
0.10(mg/l) (166.352)	-	-	12.332*	23.776*	25.972*	42.842*	46.084*
0.50(mg/l) (154.030)	-	-	-	11.444*	13.640*	30.510*	33.752*
1.00(mg/l) (142.586)	-	-	-	-	2.196	19.066*	22.308*
1.50(mg/l) (140.390)	-	-	-	-	-	16.870*	20.112*
2.00(mg/l) (123.520)	-	-	-	-	-	-	3.242
5.00(mg/l) (120.278)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 34 ก การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มสีรีแอคทีฟ (Sumifix HF Yellow 3R Gran) บนผ้าที่ย้อมด้วยน้ำที่มีปริมาณทองแดงต่างกัน

	0.00(mg/l) (153.074)	0.10(mg/l) (144.224)	1.50(mg/l) (141.684)	1.00(mg/l) (140.484)	2.00(mg/l) (138.974)	0.50(mg/l) (138.202)	5.00(mg/l) (133.776)
0.00(mg/l) (153.074)	-	8.850	11.390*	12.590*	14.100*	14.872*	19.298*
0.10(mg/l) (144.224)	-	-	2.540	3.740	5.250	6.022	10.448*
1.50(mg/l) (141.684)	-	-	-	1.200	2.710	3.482	7.908
1.00(mg/l) (140.484)	-	-	-	-	1.510	2.282	6.708
2.00(mg/l) (138.974)	-	-	-	-	-	0.772	5.198
0.50(mg/l) (138.202)	-	-	-	-	-	-	4.426
5.00(mg/l) (133.776)	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 35ก ความเข้มเฉลี่ยสีของผ้าที่ย้อมด้วยน้ำย้อมที่มีปริมาณทองแดงต่างๆ

ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำย้อม	ชนิดของสีย้อม		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	146.46	169.45	153.07
0.10	141.10	166.36	144.22
0.50	138.12	154.03	138.20
1.00	129.05	142.59	140.48
1.50	126.24	140.39	141.68
2.00	122.40	123.52	138.97
5.00	124.07	120.28	133.78

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1ข ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีน้ำเงิน

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	35.53	4.33	-37.27	37.52	276.63
0.00	35.8	4.38	-37.46	37.71	276.66
0.00	35.99	4.03	-37.06	37.28	276.2
0.00	35.07	4.39	-37.2	37.46	276.73
0.00	35.45	4.19	-36.98	37.21	276.46
10.00	35.67	3.39	-36.62	36.77	275.29
10.00	35.4	3.71	-37.05	37.24	275.72
10.00	35.83	3.78	-36.91	37.1	275.84
10.00	35.81	3.93	-37.17	37.38	276.04
10.00	35.21	3.68	-36.94	37.13	275.69
20.00	35.19	3.38	-36.81	36.97	275.25
20.00	35.51	3.2	-36.8	36.94	274.97
20.00	34.9	3.52	-37	37.17	275.44
20.00	34.27	3.95	-36.91	37.12	276.11
20.00	35.14	3.44	-36.5	36.66	275.39
30.00	34.51	3.17	-36.7	36.83	274.94
30.00	34.95	3.3	-37.1	37.24	275.08
30.00	34.65	2.7	-36.47	36.57	274.24
30.00	34.44	3.63	-37.03	37.21	275.59
30.00	34.66	3.19	-36.27	36.41	275.03
40.00	33.97	3.04	-36.68	36.81	274.74
40.00	33.31	3.37	-36.8	36.96	275.23
40.00	34.24	3.76	-37.02	37.21	275.8
40.00	33.76	3.09	-36.1	36.23	274.89
40.00	33.88	3.18	-36.28	36.42	275
50.00	32.79	3.39	-36.51	36.67	275.3
50.00	32.95	2.98	-36.47	36.59	274.67
50.00	32.67	3.53	-36.77	36.94	275.48
50.00	32.95	2.8	-36.15	36.26	274.43
50.00	32.89	2.67	-35.93	36.03	274.26
100.00	30.27	2.31	-35.78	35.85	273.69
100.00	31.18	1.42	-34.68	34.71	272.34
100.00	31.24	1.52	-34.99	35.03	272.49
100.00	30.26	2.56	-36.26	36.35	274.03
100.00	30.43	2.35	-35.93	36.01	273.74

ตารางที่2ข ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีแดง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	42.71	57.82	11.64	58.98	11.38
0.00	43.25	58.2	11.7	59.36	11.37
0.00	43.51	57.97	11.34	59.07	11.07
0.00	43.62	58.07	10.96	59.09	10.68
0.00	43.52	58.12	11.31	59.21	11.01
10.00	43.58	58.72	11.76	59.88	11.33
10.00	43	58.72	12.65	60.06	12.15
10.00	42.42	58.48	12.52	59.81	12.09
10.00	42.24	57.77	12.4	59.09	12.12
10.00	43.19	58.86	13.4	60.36	12.82
20.00	41.78	58.52	12.27	59.79	11.84
20.00	42.47	58.7	11.87	59.89	11.43
20.00	42.32	58.46	12.28	59.74	11.86
20.00	41.91	58.56	11.88	59.75	11.47
20.00	41.71	58.14	11.69	59.3	11.37
30.00	40.91	56.69	12.35	58.02	12.29
30.00	41.29	58.67	12.23	59.93	11.77
30.00	40.92	58.33	12.19	59.59	11.81
30.00	41.27	58.74	11.95	59.94	11.5
30.00	41.02	58.94	12.05	60.16	11.55
40.00	40.55	58	11.59	59.15	11.3
40.00	40.74	58.45	11.44	59.56	11.07
40.00	40.74	58.31	11.68	59.47	11.32
40.00	40.59	58.15	10.15	59.03	9.91
40.00	40.87	57.89	10.13	58.77	9.92
50.00	40.2	57.43	8.51	58.06	8.43
50.00	40.18	58.31	10.87	59.31	10.56
50.00	40.33	58.25	10.73	59.23	10.44
50.00	40.74	58.12	11.08	59.17	10.79
50.00	40.24	58	10.89	59.01	10.63
100.00	39.78	58.1	11.52	59.23	11.22
100.00	39.19	58.05	10.06	58.91	9.83
100.00	39.68	57.72	9.38	58.48	9.23
100.00	3.5	57.95	9.68	58.75	9.49
100.00	39.83	57.35	8.59	57.99	8.52

ตารางที่ 3ข ปริมาณแคลเซียมในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีเหลือง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	69.25	33.38	74.81	81.92	65.95
0.00	68.87	33.49	75.15	82.27	65.98
0.00	69.48	33.47	75.32	82.42	66.04
0.00	68.34	33.35	74.95	82.04	66.01
0.00	68.93	33.32	75.18	82.24	66.1
10.00	68.78	35.37	76.54	84.31	65.2
10.00	68.85	35.28	76.58	84.32	65.26
10.00	68.92	35.41	77.01	84.76	65.31
10.00	68.64	35.18	76.6	84.3	65.33
10.00	68.58	33.92	75.72	82.97	65.87
20.00	68.71	35.07	76.52	84.17	65.38
20.00	68.33	35.5	76.59	84.42	65.13
20.00	68.14	34.95	76.9	84.47	65.56
20.00	68.68	34.92	76.2	83.82	65.38
20.00	68	34.8	75.95	83.54	65.38
30.00	67.74	35.12	77.04	84.67	65.49
30.00	67.2	36.32	77.42	85.52	64.87
30.00	68.21	35.87	76.76	84.73	64.95
30.00	67.07	35.85	76.88	84.83	65
30.00	67.56	35.58	76.92	84.75	65.18
40.00	66.88	35.34	76.65	84.4	65.25
40.00	66.54	35.68	76.81	84.69	65.08
40.00	66.75	35.29	76.86	84.57	65.34
40.00	66.26	34.73	75.84	83.41	65.4
40.00	66.66	35.01	76.75	84.36	65.48
50.00	66.13	34.95	76.28	83.91	65.38
50.00	66.54	34.88	75.89	83.52	65.32
50.00	65.94	34.57	76.01	83.51	65.54
50.00	65.79	34.74	75.94	83.51	65.42
50.00	65.27	34.75	76.09	83.65	65.45
100.00	64.86	31.96	73.45	80.1	66.49
100.00	65.07	31.66	73.38	79.92	66.66
100.00	64.47	32.32	72.75	79.6	66.05
100.00	64.71	31.87	73.29	79.92	66.5
100.00	64.69	32.12	73.73	80.42	66.46

ตารางที่ 4ข ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีน้ำเงิน

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	35.53	4.33	-37.27	37.52	276.63
0.00	35.8	4.38	-37.46	37.71	276.66
0.00	35.99	4.03	-37.06	37.28	276.2
0.00	35.07	4.39	-37.2	37.46	276.73
0.00	35.45	4.19	-36.98	37.21	276.46
10.00	35.11	4.31	-37.35	37.6	276.59
10.00	35.51	4.06	-37.17	37.39	276.24
10.00	35.5	2.89	-36.63	36.75	274.52
10.00	35.19	2.97	-36.67	36.79	274.63
10.00	35.71	3.16	-36.83	36.96	274.9
20.00	34.97	3.39	-36.93	37.09	275.24
20.00	35.05	3.78	-37.05	37.24	275.83
20.00	34.74	2.68	-36.41	36.51	274.22
20.00	34.72	2.75	-36.46	36.56	274.31
20.00	34.99	3.03	-36.74	36.87	274.71
30.00	34.04	3.02	-36.75	36.87	274.7
30.00	34.15	3.2	-36.65	36.79	275
30.00	33.6	3.12	-36.76	36.89	274.85
30.00	34.01	2.69	-36.1	36.2	274.26
30.00	34.06	3.31	-36.9	37.05	275.12
40.00	33.46	3.4	-36.74	36.9	275.29
40.00	34.08	3.25	-36.81	36.96	275.04
40.00	33.34	2.77	-36.51	36.61	274.34
40.00	33.81	2.57	-36.38	36.47	274.03
40.00	33.79	2.51	-36.16	36.24	273.98
50.00	32.69	2.38	-36.11	36.19	273.78
50.00	32.71	2.32	-35.98	36.05	273.69
50.00	33.19	2.21	-35.99	36.06	273.52
50.00	32.44	3.05	-36.63	36.76	274.76
50.00	33.09	2.87	-36.64	36.76	274.48
100.00	32.74	1.85	-35.54	35.59	272.98
100.00	32.79	1.89	-35.65	35.7	273.03
100.00	32.5	1.99	-35.59	35.64	273.2
100.00	33.25	1.8	-35.41	35.46	272.92
100.00	32.34	1.61	-35.44	35.48	272.6

ตารางที่ 5ข ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีแดง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	42.71	57.82	11.64	58.98	11.38
0.00	43.25	58.2	11.7	59.36	11.37
0.00	43.51	57.97	11.34	59.07	11.07
0.00	43.62	58.07	10.96	59.09	10.68
0.00	43.52	58.12	11.31	59.21	11.01
10.00	42.69	58.8	12.57	60.13	12.07
10.00	43.19	58.92	12.64	60.26	12.11
10.00	43.42	58.78	12.51	60.09	12.02
10.00	43.48	57.72	12.48	59.05	12.2
10.00	43.19	57.36	11.57	58.52	11.41
20.00	43.37	56.8	10.14	57.7	10.12
20.00	43.49	57.18	11.09	58.24	10.98
20.00	43.08	59	12.42	60.3	11.88
20.00	43.29	59.02	12.5	60.33	11.96
20.00	43.18	58.91	12.53	60.22	12.01
30.00	42.87	57.42	12.08	58.68	11.88
30.00	43.32	57.27	11.44	58.4	11.3
30.00	43.29	58.56	11.98	59.77	11.56
30.00	42.13	58.67	11.06	59.71	10.68
30.00	43.09	58.76	12.18	60	11.71
40.00	42.17	58.66	12.16	59.91	11.71
40.00	42.31	58.76	11.81	59.94	11.36
40.00	42.4	58.56	11.78	59.73	11.37
40.00	42.61	56.98	10.87	58.01	10.8
40.00	42.64	57.47	12.1	58.73	11.89
50.00	43.42	58.38	11.47	59.5	11.12
50.00	42.1	58.63	11.76	59.79	11.35
50.00	42.02	58.47	11.8	59.65	11.41
50.00	42.62	57.23	10.95	58.26	10.83
50.00	42.19	57.04	10.82	58.06	10.75
100.00	41.46	57.76	8.88	58.44	8.74
100.00	41.13	58.05	9.38	58.81	9.18
100.00	41.96	58.05	9.53	58.83	9.32
100.00	41.28	56.92	9.66	57.73	9.63
100.00	41.22	56.76	9.28	57.51	9.28

ตารางที่ 6ข ปริมาณแมกนีเซียมในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีเหลือง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	69.25	33.38	74.81	81.92	65.95
0.00	68.87	33.49	75.15	82.27	65.98
0.00	69.48	33.47	75.32	82.42	66.04
0.00	68.34	33.35	74.95	82.04	66.01
0.00	68.93	33.32	75.18	82.24	66.1
10.00	67.85	37.25	78.09	86.52	64.5
10.00	67.57	37.29	77.9	86.36	64.42
10.00	67.7	37.24	78.24	86.65	64.55
10.00	67.69	37.26	78.04	86.48	64.48
10.00	67.69	37.31	78.38	86.81	64.54
20.00	67.36	36.82	78.02	86.27	64.74
20.00	67.39	36.76	77.82	86.07	64.72
20.00	67.54	36.9	78.41	86.66	64.8
20.00	67.5	36.63	77.9	86.08	64.82
20.00	67.26	37.07	78.52	86.83	64.73
30.00	67.27	36.54	77.97	86.11	64.89
30.00	67.36	37.18	78.08	86.48	64.54
30.00	67.16	36.88	77.76	86.06	64.62
30.00	67.13	37.12	78.01	86.4	64.55
30.00	67.21	36.78	78.02	86.26	64.76
40.00	66.2	36.45	77.24	85.4	64.74
40.00	66.39	36.2	77.56	85.59	64.98
40.00	66.28	36.57	77.5	85.7	64.74
40.00	67.15	36.99	78.05	86.37	64.64
40.00	66.28	36.46	77.14	85.32	64.7
50.00	65.97	35.74	77.35	85.21	65.2
50.00	65.43	36.45	77.38	85.54	64.78
50.00	65.12	35.92	78.14	86	65.31
50.00	65.7	36.66	78.2	86.37	64.88
50.00	65.42	36.52	77.73	85.88	64.84
100.00	65.27	35.54	76.77	84.6	65.16
100.00	64.79	35.45	76.74	84.53	65.2
100.00	64.85	35.12	76.58	84.25	65.36
100.00	64.24	35.52	77.02	84.82	65.24
100.00	64.46	35.11	76.96	84.59	65.48

ตารางที่ 7ข ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีน้ำเงิน

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	35.53	4.33	-37.27	37.52	276.63
0.00	35.8	4.38	-37.46	37.71	276.66
0.00	35.99	4.03	-37.06	37.28	276.2
0.00	35.07	4.39	-37.2	37.46	276.73
0.00	35.45	4.19	-36.98	37.21	276.46
0.10	35.71	3.1	-36.43	36.56	274.86
0.10	35.1	4.13	-36.82	37.05	276.39
0.10	34.71	4.36	-37.05	37.31	276.7
0.10	35.25	3.31	-36.64	36.78	275.16
0.10	35.11	3.4	-36.75	36.91	275.29
0.50	35.07	3.81	-36.95	37.14	275.89
0.50	35.14	4.14	-36.94	37.17	276.4
0.50	34.97	4.01	-36.67	36.89	276.24
0.50	34.97	3.36	-36.49	36.64	275.26
0.50	34.62	3.51	-36.61	36.78	275.48
1.00	34.24	3.7	-36.8	36.98	275.74
1.00	34.25	4.14	-36.48	36.72	276.47
1.00	34.71	4.13	-36.74	36.97	276.42
1.00	34.91	3.27	-36.46	36.6	275.12
1.00	33.96	3.36	-36.65	36.81	275.24
1.50	33.71	3.3	-36.4	36.54	275.19
1.50	34.02	3.71	-36.18	36.37	275.86
1.50	33.84	4.28	-37.04	37.28	276.59
1.50	33.42	3.05	-36.47	36.6	274.78
1.50	33.98	3.21	-36.5	36.64	275.02
2.00	33.14	3.01	-36.2	36.33	274.75
2.00	33.33	3.53	-36.15	36.32	275.58
2.00	34.05	3.9	-36.57	36.78	276.09
2.00	33.47	3.19	-36.21	36.35	275.03
2.00	33.81	3.28	-36.36	36.51	275.15
5.00	33.18	3.08	-36.39	36.52	274.83
5.00	32.75	2.59	-35.96	36.06	274.13
5.00	32.76	2.6	-36.11	36.21	274.12
5.00	32.71	2.75	-36.36	36.47	274.32
5.00	32.75	3.41	-36.3	36.46	275.37

ตารางที่ 8ข ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีแดง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	42.71	57.82	11.64	58.98	11.38
0.00	43.25	58.2	11.7	59.36	11.37
0.00	43.51	57.97	11.34	59.07	11.07
0.00	43.62	58.07	10.96	59.09	10.68
0.00	43.52	58.12	11.31	59.21	11.01
0.10	42.84	58.27	12.05	59.5	11.69
0.10	42.70	57.77	10.38	58.7	10.18
0.10	42.34	58.12	11.27	59.2	10.97
0.10	42.35	57.97	12.44	59.29	12.11
0.10	42.31	57.75	12.13	59.01	11.86
0.50	42.18	57.95	12.44	59.27	12.11
0.50	42.24	57.8	13.05	59.25	12.72
0.50	42.05	58.1	11.55	59.24	11.24
0.50	42.90	58.23	12	59.45	11.64
0.50	42.14	57.84	11.91	59.06	11.63
1.00	42.10	57.96	11.55	59.09	11.27
1.00	41.93	57.88	11.99	59.11	11.7
1.00	41.24	57.92	11.44	59.03	11.17
1.00	41.81	58.09	12.21	59.36	11.87
1.00	41.70	57.77	12.02	59.01	11.75
1.50	40.83	57.73	12	58.96	11.74
1.50	40.59	57.31	11.94	58.54	11.77
1.50	40.83	57.91	11.86	59.11	11.58
1.50	40.12	58.41	12.11	59.65	11.71
1.50	40.98	58.21	12.27	59.49	11.9
2.00	40.24	58.34	12.43	59.65	12.02
2.00	39.59	58.36	11.49	59.48	11.14
2.00	39.29	58.27	11.98	59.49	11.61
2.00	39.36	57.8	12.47	59.13	12.18
2.00	39.30	58.08	12.15	59.34	11.82
5.00	38.21	57.32	13.2	58.82	12.97
5.00	38.53	58.13	11.75	59.31	11.43
5.00	37.22	58.03	11.85	59.23	11.54
5.00	37.15	58.36	12.03	59.58	11.65
5.00	37.69	58.8	12.57	60.13	12.07

ตารางที่ 9ข ปริมาณเหล็กในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟสีเหลือง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	69.25	33.38	74.81	81.92	65.95
0.00	68.87	33.49	75.15	82.27	65.98
0.00	69.48	33.47	75.32	82.42	66.04
0.00	68.34	33.35	74.95	82.04	66.01
0.00	68.93	33.32	75.18	82.24	66.1
0.10	68.54	36.73	77.71	85.95	64.7
0.10	68.68	37.15	77.56	86.91	64.69
0.10	68.05	37.13	78.18	86.54	64.6
0.10	68.44	36.82	78.39	86.61	64.84
0.10	68.18	37.1	77.74	87.05	64.77
0.50	67.93	36.93	78.7	86.94	64.86
0.50	67.97	36.78	78.51	86.7	64.9
0.50	67.95	37.22	78.63	86.99	64.67
0.50	67.83	36.88	78.12	86.39	64.73
0.50	67.98	37.21	78.6	86.96	64.67
1.00	67.73	37.37	78.63	86.51	64.41
1.00	67.38	37.19	78.66	87	64.7
1.00	67.05	37.84	78.99	87.59	64.4
1.00	67.18	37.81	78.94	87.53	64.41
1.00	67.36	37.25	78.97	86.78	64.58
1.50	66.79	37.12	78.73	86.5	64.59
1.50	66.96	37.13	78.89	86.74	64.66
1.50	66.93	37.22	78.73	87.09	64.7
1.50	67.09	36.8	78.2	86.43	64.8
1.50	66.21	36.59	78.88	86.04	64.84
2.00	65.86	36.88	78.72	86.39	64.73
2.00	65.86	37.3	78.86	87.24	64.69
2.00	66.12	36.85	78.57	86.78	64.87
2.00	65.83	36.79	78.9	86.15	64.72
2.00	65.76	36.83	78.47	85.78	64.57
5.00	65.34	36.2	79.25	86.22	65.17
5.00	64.94	37.01	79.41	86.71	64.73
5.00	65.08	36.49	79.64	85.79	64.83
5.00	65.09	36.56	79.09	86.23	64.91
5.00	64.73	36.6	79.33	85.55	64.67

ตารางที่ 10ข ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีน้ำเงิน

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	35.53	4.33	-37.27	37.52	276.63
0.00	35.8	4.38	-37.46	37.71	276.66
0.00	35.99	4.03	-37.06	37.28	276.2
0.00	35.07	4.39	-37.2	37.46	276.73
0.00	35.45	4.19	-36.98	37.21	276.46
0.10	35.09	4.84	-37.56	37.87	277.34
0.10	35.00	4.74	-37.28	37.58	277.24
0.10	35.17	3.57	-36.74	36.91	275.56
0.10	35.09	3.77	-36.83	37.02	275.85
0.10	35.26	3.59	-36.87	37.04	275.57
0.50	34.84	3.59	-36.98	37.15	275.54
0.50	34.64	3.55	-36.77	36.94	275.51
0.50	35.02	3.73	-36.8	36.99	275.79
0.50	34.21	4.73	-37.27	37.57	277.24
0.50	35.13	4.51	-37.35	37.62	276.89
1.00	33.76	3.45	-36.65	36.81	275.38
1.00	33.75	3.36	-36.51	36.66	275.25
1.00	33.57	3.43	-36.65	36.81	275.34
1.00	33.48	4.01	-37.25	37.46	276.14
1.00	33.88	3.86	-36.87	37.07	275.98
1.50	33.34	3.31	-36.24	36.39	275.22
1.50	33.07	3.46	-36.47	36.64	275.42
1.50	33.38	3.34	-36.48	36.63	275.23
1.50	33.15	4.48	-37.44	37.7	276.82
1.50	33.07	4.22	-36.95	37.19	276.51
2.00	32.7	3.68	-36.23	36.42	275.81
2.00	32.92	3.74	-36.53	36.73	275.85
2.00	33.06	3.6	-36.41	36.59	275.64
2.00	32.15	4.24	-37.08	37.32	276.52
2.00	33.07	4.16	-36.98	37.21	276.42
5.00	31.62	3.87	-36.73	36.94	276.01
5.00	31.76	4.17	-36.82	37.06	276.46
5.00	31.82	3.02	-36	36.13	274.79
5.00	31.75	3.09	-36.05	36.18	274.9
5.00	31.15	2.97	-36.09	36.21	274.7

ตารางที่ 11ข ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีแดง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	42.71	57.82	11.64	58.98	11.38
0.00	43.25	58.2	11.7	59.36	11.37
0.00	43.51	57.97	11.34	59.07	11.07
0.00	43.62	58.07	10.96	59.09	10.68
0.00	43.52	58.12	11.31	59.21	11.01
0.10	42.18	57.78	11.43	58.9	11.19
0.10	43.27	57.42	10.8	58.43	10.65
0.10	42.59	57.36	9.37	58.12	9.28
0.10	42.75	57.68	9.48	58.45	9.33
0.10	42.56	57.89	9.78	58.71	9.59
0.50	42.00	57.59	11.21	58.67	11.01
0.50	42.04	57.49	11.9	58.71	11.69
0.50	42.25	57.26	11.35	59.36	11.03
0.50	42.46	57.51	11.79	59.69	11.39
0.50	42.27	57.71	11.41	58.83	11.18
1.00	41.89	57.48	11.42	58.6	11.23
1.00	41.88	57.52	11.74	58.71	11.54
1.00	41.65	57.37	11.71	59.53	11.34
1.00	41.51	57.56	11.81	59.74	11.4
1.00	41.66	57.36	11.26	59.43	10.92
1.50	41.5	57.17	11.43	58.3	11.3
1.50	40.67	57.3	11.84	58.51	11.67
1.50	41.01	57.6	11.25	59.67	10.87
1.50	40.63	57.51	11.85	59.7	11.45
1.50	40.44	57.52	12.27	59.79	11.84
2.00	40.27	57.43	11.07	59.47	10.73
2.00	40.18	57.07	10.87	59.08	10.6
2.00	40.05	57.37	11.41	59.48	11.06
2.00	40.09	57.33	11.66	58.5	11.5
2.00	40.09	57.42	11.79	58.62	11.61
5.00	39.84	57.27	11.66	58.44	11.51
5.00	39.72	57.39	11.42	58.52	11.26
5.00	39.69	56.56	11.34	59.65	10.96
5.00	39.54	56.54	11.4	59.64	11.02
5.00	39.22	56.46	11.92	59.67	11.52

ตารางที่ 12ข ปริมาณแมงกานีสในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีเหลือง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	69.25	33.38	74.81	81.92	65.95
0.00	68.87	33.49	75.15	82.27	65.98
0.00	69.48	33.47	75.32	82.42	66.04
0.00	68.34	33.35	74.95	82.04	66.01
0.00	68.93	33.32	75.18	82.24	66.1
0.10	68.63	36.32	77.73	85.79	64.95
0.10	68.56	36.01	77.47	85.43	65.07
0.10	68.29	36.19	77.54	85.56	64.98
0.10	68.61	35.86	77.3	85.22	65.11
0.10	68.49	36.12	77.13	85.17	64.91
0.50	68.28	35.97	76.94	84.94	64.94
0.50	68.23	36.05	77.11	85.12	64.94
0.50	68.18	36	77.03	85.03	64.95
0.50	68.06	36.18	77.56	85.58	65
0.50	68.16	36.34	77.56	85.65	64.89
1.00	67.99	35.22	76.81	84.51	65.37
1.00	67.28	35.67	77.16	85.01	65.19
1.00	67.23	35.6	77.49	85.27	65.32
1.00	67.96	35.65	77.15	84.99	65.2
1.00	67.33	35.88	77.83	85.7	65.25
1.50	66.95	35.26	76.72	84.44	65.32
1.50	66.26	35.61	77.28	85.09	65.26
1.50	66.97	35.42	77.03	84.78	65.3
1.50	66.44	35.46	77.26	85.01	65.35
1.50	66.92	35.43	76.78	84.56	65.23
2.00	66.23	35.41	77.14	84.88	65.34
2.00	66.05	35.35	76.98	84.71	65.33
2.00	68.93	35.23	76.94	84.62	65.39
2.00	68.75	35.03	76.83	84.43	65.49
2.00	68.66	35.11	76.64	84.3	65.39
5.00	66.26	34.25	75.93	83.3	65.72
5.00	65.25	34.35	75.82	83.23	65.63
5.00	66.01	34.65	76.71	84.17	65.69
5.00	65.62	34.16	75.66	83.01	65.7
5.00	65.89	34.26	76.06	83.42	65.76

ตารางที่ 13ข ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีน้ำเงิน

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	35.53	4.33	-37.27	37.52	276.63
0.00	35.8	4.38	-37.46	37.71	276.66
0.00	35.99	4.03	-37.06	37.28	276.2
0.00	35.07	4.39	-37.2	37.46	276.73
0.00	35.45	4.19	-36.98	37.21	276.46
0.10	35.83	3.8	-36.06	36.17	274.45
0.10	35.43	3.72	-35.98	36.09	274.32
0.10	35.1	3.66	-36.01	36.11	274.22
0.10	35.21	3.91	-37.32	37.64	277.49
0.10	35.07	3.52	-37.29	37.57	276.9
0.50	34.13	3.96	-36.37	36.49	274.66
0.50	34.35	3.24	-36.54	36.69	275.06
0.50	34.45	3.97	-36.26	36.38	274.68
0.50	34.68	4.55	-37.31	37.59	276.96
0.50	34.27	4.79	-37.33	37.64	277.31
1.00	33.64	4.41	-36.6	36.76	275.33
1.00	34.17	4.58	-37	37.28	277.06
1.00	34.28	4.53	-37.47	37.74	276.9
1.00	34.38	4.07	-36.47	36.6	274.81
1.00	34.01	4.22	-36.57	36.71	275.03
1.50	33.82	4.87	-36.27	36.38	274.53
1.50	33.46	4.01	-36.34	36.47	274.74
1.50	34	4.09	-36.31	36.44	274.86
1.50	33.26	4.7	-37.29	37.58	277.18
1.50	33.9	4.73	-37.08	37.38	277.27
2.00	33.7	4.54	-37.28	37.56	276.94
2.00	33.12	4.1	-36.84	37.07	276.35
2.00	33.89	4.15	-36.31	36.45	274.96
2.00	33.94	4.09	-36.34	36.47	274.86
2.00	33.43	4.19	-36.06	36.2	275.05
5.00	33.45	4	-36.73	36.95	276.21
5.00	33.29	4.42	-37.26	37.52	276.77
5.00	32.81	4.02	-36.29	36.41	274.75
5.00	32.59	4.15	-36.53	36.67	274.93
5.00	33.16	4.29	-36.52	36.67	275.15

ตารางที่ 14ข ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีแดง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	42.71	57.82	11.64	58.98	11.38
0.00	43.25	58.2	11.7	59.36	11.37
0.00	43.51	57.97	11.34	59.07	11.07
0.00	43.62	58.07	10.96	59.09	10.68
0.00	43.52	58.12	11.31	59.21	11.01
0.10	42.21	57.9	12.76	59.29	12.43
0.10	42.03	57.77	12.75	59.16	12.44
0.10	42.4	57.93	10.33	58.84	10.11
0.10	43.05	57.91	10.78	58.91	10.55
0.10	42.8	57.46	11.54	58.61	11.35
0.50	41.66	57.52	11.8	58.72	11.59
0.50	41.25	57.47	10.96	58.51	10.8
0.50	41.47	57.89	11.32	58.99	11.07
0.50	41.33	58.1	11.51	59.23	11.21
0.50	41.14	57.89	11.81	59.08	11.53
1.00	40.95	57.06	11.63	58.23	11.52
1.00	40.89	56.94	11.24	58.04	11.16
1.00	40.86	57.17	10.39	58.11	10.3
1.00	40.75	57.41	10.81	58.42	10.66
1.00	40.42	56.91	10.59	57.89	10.54
1.50	40.53	56.88	10.67	57.87	10.63
1.50	40.16	56.78	10.22	57.69	10.21
1.50	40.08	56.87	10.44	57.82	10.4
1.50	40.12	56.66	11.04	57.73	11.03
1.50	40.11	56.12	10.75	57.14	10.84
2.00	39.45	56.07	10.67	57.08	10.77
2.00	39.82	56.19	10.96	57.24	11.04
2.00	39.2	55.62	8.37	56.24	8.56
2.00	39.71	55.68	8.61	56.34	8.79
2.00	39.86	55.84	8.71	56.51	8.86
5.00	39.01	53.06	7.66	53.61	8.21
5.00	38.27	53.41	8.01	54	8.53
5.00	38.7	53.18	7.77	53.75	8.31
5.00	39.13	53.34	8.5	54.01	9.05
5.00	39.05	52.92	8.68	53.63	9.32

ตารางที่ 15ข ปริมาณทองแดงในน้ำต่อค่าความแตกต่างของสีของผ้าที่ย้อมด้วยสีเหลือง

ความเข้มข้น	CIELAB				
(mg/l)	CIE L	CIE a	CIE b	CIE C	CIE h
0.00	69.25	33.38	74.81	81.92	65.95
0.00	68.87	33.49	75.15	82.27	65.98
0.00	69.48	33.47	75.32	82.42	66.04
0.00	68.34	33.35	74.95	82.04	66.01
0.00	68.93	33.32	75.18	82.24	66.1
0.10	67.8	36.67	77.42	85.67	64.66
0.10	67.76	36.92	77.75	86.07	64.6
0.10	67.82	36.68	77.74	85.96	64.74
0.10	67.68	36.82	77.93	86.19	64.71
0.10	68.17	36.04	77.1	85.1	64.95
0.50	67.38	36	77.01	85.01	64.94
0.50	67.29	36.03	77	85.01	64.93
0.50	67.13	36.25	77.48	85.54	64.93
0.50	67.23	36.23	77.53	85.58	64.96
0.50	66.97	36.29	77.46	85.54	64.9
1.00	66.79	36.14	77.25	85.28	64.93
1.00	66.13	36.31	77.89	85.94	65
1.00	66.93	36.24	77.44	85.5	64.92
1.00	66.94	36.57	77.71	85.88	64.8
1.00	66.05	35.94	77.77	83.86	64.63
1.50	66.85	35.76	77.16	85.04	65.13
1.50	66.71	35.41	77.7	84.48	65.22
1.50	66.64	36.32	77.41	85.51	64.86
1.50	66.64	35.83	77.26	85.16	65.12
1.50	67.06	35.59	76.98	84.81	65.19
2.00	65.41	35.71	77.56	85.38	65.28
2.00	65.52	36.07	77.23	85.23	64.97
2.00	65.88	35.62	77	84.84	65.18
2.00	65.29	35.9	77.47	85.38	65.13
2.00	65.17	35.38	77.55	84.33	65.2
5.00	64.84	35.25	77.47	84.21	65.25
5.00	64.2	34.95	77.53	84.13	65.45
5.00	64.25	34.98	77.55	84.16	65.44
5.00	64.14	34.82	77.13	83.72	65.42
5.00	63.98	34.89	77.22	83.83	65.4

ภาคผนวก ค

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างบนวัสดุสิ่งทอ

(Colour Fastness to Domestic Commercial Laundering)

1. มาตรฐานการทดสอบ

ISO 105-C06: 1994 (E) Colour fastness to domestic commercial laundering

2. ขอบเขต

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างวิธีนี้ กำหนดขึ้นสำหรับทดสอบความคงทนของสีของวัสดุสิ่งทอทุกประเภท ต่อลักษณะการซักในการใช้งานจริงตามบ้านเรือน ในอุตสาหกรรม ตามโรงพยาบาล

3. หลักการ

ชิ้นทดสอบที่ประกบติดอยู่กับผ้าขาว 2 ชนิด(two single fiber adjacent fabrics) หรือประกบติดอยู่กับผ้าหลายเส้นใย(multifiber adjacent fabric) ถูกนำมาทดสอบความคงทนของสีต่อการซักในสารละลายน้ำสบู่มาตรฐาน ภายในอุณหภูมิ และเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำมาล้างน้ำ และทำให้แห้ง เพื่อประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสี(colour change) บนชิ้นงานทดสอบ และประเมินค่าการติดเปื้อนสี(colour staining) บนผ้าขาว 2 ชนิด(two single fiber adjacent fabrics) หรือประกบติดอยู่กับผ้าหลายเส้นใย(multifiber adjacent fabric)

4. อุปกรณ์ สารเคมี และวัสดุ

4.1 Launder-O meter หรือ wash wheel หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในอ่าง (water bath) ได้ และมีความเร็วรอบของการหมุน 40 ± 2 รอบต่อนาที

4.2 ภาชนะบรรจุ(stainless steel containers) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 ± 5 มิลลิเมตร มีความสูง 125 ± 10 มิลลิเมตร และมีปริมาตรความจุ 550 ± 50 มิลลิเมตร

4.3 ลูกเหล็กกลม(steel ball) ที่ไม่เป็นสนิมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร

4.4 ผงซักฟอกมาตรฐาน ที่ปราศจากสารเรืองแสง(optical brightener) โดยใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งดังต่อไปนี้

- ผงซักฟอกมาตรฐาน AATCC reference detergent โดยผงซักฟอกนี้จะมีฟองปริมาณน้อย ในผงซักฟอกมีสาร surfactant ประเภท anionic และมีสารประกอบที่เป็น non-ionic และ biodegradable อยู่ในปริมาณที่เล็กน้อย
- ผงซักฟอกมาตรฐาน ECE detergent

4.5 ผ้าขาว 2 เส้นใย(two single fiber adjacent fabrics)

4.6 ผ้าหลายเส้นใย(multifiber adjacent fabric) ชนิด TV Type (ISO 105-F10) โดยมีลายละเอียดชนิดของเส้นใยตาม ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 multifiber adjacent fabric : DW type หรือ TV type

multifiber adjacent fabric: DW type (ใช้ทดสอบที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C)	**multifiber adjacent fabric : TV type (ใช้ทดสอบที่อุณหภูมิเกิน 60°C)**
อะซิเทต	ไตรอะซิเทต
ฝ้าย	ฝ้าย
ไนลอน	ไนลอน
พอลิเอสเทอร์	พอลิเอสเทอร์
อะครีลิก	อะครีลิก
ขนสัตว์	วอสโคส

4.7 เกรย์สเกล สำหรับประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของสี และค่าการติดเปื้อนสีตามมาตรฐาน ISO 105-A02 และ 105-A03

4.8 น้ำเกรด 3

4.9 โซเดียมคาร์บอเนต(Na_2CO_3) กรัมต่อลิตร

4.10 sodium hypochlorite หรือ lithium hypochlorite

4.11 sodium perborate tertrahydrate($NaBO_3.4H_2O$) 1 กรัมต่อลิตร

4.12 acetic Acid (glacial acetic 0.2 กรัมต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร)

5. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

5.1 กรณีที่ชิ้นงานทดสอบเป็นผืนผ้า ให้เลือกวิธีเตรียมชิ้นงานทดสอบวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

5.1.1 ชิ้นงานทดสอบประกบกับผ้า multifiber เตรียมได้ดังนี้

- ตัดชิ้นงานทดสอบขนาด 40 X 100 มิลลิเมตร โดยตัดตามความยาวของผ้า ทดสอบจำนวน 2 ชิ้น(โดยชิ้นแรกใช้ทดสอบ ส่วนชิ้นที่ 2 เป็นตัวเทียบในขั้นตอนการประเมินผล) กรณีที่เป็นผ้าทอควรเย็บริมทั้ง 4 ด้านด้วยเส้นสีขาวเพื่อป้องกันการหลุดลุ่ยของริมผ้าในระหว่างการทดสอบ
- ตัดผ้า Multifiber ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร และนำมาเย็บริมด้านยาวทั้งสองด้านด้วยเส้นด้ายสีขาว เพื่อป้องกันการหลุดลุ่ยของริมผ้าในระหว่างการทดสอบ
- นำชิ้นงานทดสอบเย็บประกบติดกับผ้า multifiber โดยเย็บด้านกว้างตรงตำแหน่งเส้นใยวิสโคส(viscose) หรือเส้นใยขนสัตว์(wool) เพียงด้านเดียว

5.1.2 ชิ้นงานทดสอบประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย เตรียมได้ดังนี้

- ตัดชิ้นงานทดสอบมาขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร โดยการตัดตามความยาวของผ้าทดสอบ จำนวน 2 ชิ้น(โดยชิ้นแรกใช้ทดสอบ ส่วนชิ้นที่สองไว้เป็นตัวเทียบในขั้นตอนการประเมินผล) กรณีที่เป็นผ้าทอควรจะทำการเย็บริมทั้ง 4 ด้าน ด้วยด้ายสีขาว เพื่อป้องกันการหลุดลุ่ยของริมผ้าในระหว่างการทดสอบ
- ตัดผ้าขาว 2 เส้นใย ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร และนำมาเย็บริมทั้งสี่ด้านด้วยเส้นด้ายสีขาว เพื่อป้องกันการหลุดลุ่ยของริมผ้าในระหว่างการทดสอบ
- นำชิ้นงานทดสอบเย็บประกบติดกับผ้าขาวในลักษณะแซนวิสโดยให้ชิ้นทดสอบอยู่ตรงกลาง และประกบด้วยผ้าขาวทั้งสองชิ้น และเย็บด้านกว้างเพียงด้านเดียว

5.2 กรณีที่ชิ้นงานทดสอบเป็นเส้นด้ายหรือเส้นใย(yarn or loose fiber) ให้เลือกวิธีเตรียมชิ้นงาน ทดสอบวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

5.2.1 ชิ้นงานทดสอบประกบกับผ้า multifiber เตรียมได้ดังนี้

- ตัดผ้า multifiber ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร และนำมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่ได้เป็นกรัม
- ให้นำเส้นด้ายหรือเส้นใยมาชั่งน้ำหนักให้ได้เท่ากับ 0.5 เท่าของผ้า multifiber จำนวน 2 ชุด (โดยชุดแรกใช้ทดสอบ ส่วนชุดที่สองไว้เป็นตัวเทียบในขั้นตอนการประเมินผล)
- ตัดผ้า non-dyeable fabric(ให้ใช้ผ้า polypropylene) ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด
- นำเส้นด้าย หรือเส้นใยมาสาง และวางรวมกันบนผ้า non-dyeable fabric ให้ได้เป็นแผ่นขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด และเย็บริมทั้ง 4 ด้าน
- นำผ้า multifiber ประกบกับผ้า non-dyeable fabric ที่มี เส้นด้ายหรือเส้นใยที่ผ่านการสาง และวางรวมกันอยู่ และเย็บริมทั้ง 4 ด้าน

5.2.2 ชิ้นงานทดสอบประกบกับผ้าขาว 2 เส้นใย เตรียมได้ดังนี้

- ตัดผ้าขาวสองเส้นใย ขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร นำมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่ได้เป็นกรัม
- นำเส้นด้ายหรือเส้นใยชั่งน้ำหนักให้ได้ 0.5 เท่าของผ้าขาวทั้งสองชิ้น จำนวน 2 ชุด(โดยชุดแรกใช้ทดสอบ ส่วนชุดที่สองไว้เป็นตัวเทียบในขั้นตอนการประเมินผล)
- นำเส้นด้าย หรือเส้นใยมาสาง และวางรวมกันให้ได้เป็นแผ่นขนาด 40 x 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด
- นำผ้าขาวสองเส้นใย 40 x 100 มิลลิเมตรประกบด้านหน้า และด้านหลัง เส้นด้าย หรือเส้นใยที่ผ่านการสาง และวางรวมกัน และเย็บริมทั้ง 4 ด้าน

6. ภาวะการทดสอบ

ตารางที่ 2 ภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C06:1994

Test no.	temperature (°C)	liquor volume (ml)	Available chlorine (%)	Sodium perborate (g/l)	Time (min)	No.of steel balls	Adjust pH to
A1S	40	150	none	none	30	10(1)	Not adjusted
A1M	40	150	none	none	45	10	Not adjusted
A2S	40	150	none	1	30	10(1)	Not adjusted
B1S	50	150	none	none	30	25(1)	Not adjusted
B1M	50	150	none	none	45	50	Not adjusted
B2S	50	150	none	1	30	25(1)	Not adjusted
C1S	60	50	none	none	30	25	10.5 ± 0.1
C1M	60	50	none	none	45	50	10.5 ± 0.1
C2S	60	50	none	1	30	25	10.5 ± 0.1
D1S	70	50	none	none	30	25	10.5 ± 0.1
D1M	70	50	none	none	45	100	10.5 ± 0.1
D2S	70	50	none	1	30	25	10.5 ± 0.1
D3S	70	50	0.015	none	30	25	10.5 ± 0.1
D3M	70	50	0.015	none	45	100	10.5 ± 0.1
E1S	95	50	none	none	30	25	10.5 ± 0.1
E2S	95	50	none	1	30	25	10.5 ± 0.1

หมายเหตุ: (1) ในกรณีที่ชิ้นงานทดสอบมีเส้นใยขนสัตว์ และไหมเป็นองค์ประกอบ ห้ามใส่ลูกเหล็กกลม

7. การเตรียมสารละลายผงซักฟอกและเครื่องทดสอบ

7.1 เปิดเครื่องทดสอบ และนำลูกเหล็กกลม (ตามตารางที่ 2) ใส่ลงใน containers และนำ containers ใส่ลงในเครื่องทดสอบทำการเดินเครื่องให้ได้อุณหภูมิ ตามที่ต้องการทดสอบ

7.2 ชั่งผงซักฟอกมาตรฐาน AATCCC reference detergent WOB หรือ ECE detergent (ปริมาณที่ใช้ 4 กรัมต่อน้ำเกรด 3 1 ลิตร)

7.3 นำน้ำเกรด 3 ต้มให้ได้อุณหภูมิ ตามที่ต้องการ

7.4 นำผงซักฟอกมาตรฐาน ที่ชั่งได้มาละลายน้ำเกรด 3 ที่อุณหภูมิตามที่ต้องการทดสอบ(ก่อนการใช้สารละลายผงซักฟอกมาตรฐานนี้จะต้องมีอุณหภูมิตามที่ต้องการทดสอบ ดังนั้น หากอุณหภูมิไม่ถึงตามที่กำหนดต้องให้ความร้อนก่อนการใช้งาน)

7.5 ใส่สาร sodium perborate tetrahydrate($NaBO_3.4H_2O$) ตามการทดสอบลงในสารละลายผงซักฟอก

7.6 ปรับค่า pH ให้ได้ตามความต้องการ ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต(Na_2CO_3) 1 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร โดยใส่ลงในสารละลายผงซักฟอก

8. การทดสอบ

8.1 นำ containers ขึ้นมาจากเครื่องทดสอบแล้วเปิดฝา

8.2 ตวงปริมาณสารละลายผงซักฟอกตามปริมาณตามที่ต้องการ (ตามตารางที่ 2) ใส่ลงใน containers

8.3 นำชิ้นงานทดสอบใส่ลงใน containers ปิดฝา

8.4 นำ containers ใส่ลงในเครื่องทดสอบ

8.5 ตั้งอุณหภูมิ และเวลา ตามที่ต้องการทดสอบ(ตามตารางที่ 2)

8.6 หยุดเครื่องทดสอบ นำ containers ขึ้นมาจากเครื่องทดสอบแล้วเปิดฝา

8.7 เทสารละลายใน containers ใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วค่อย ๆ เทสารละลายออกให้เหลือแต่ชิ้นงานทดสอบไว้ในบีกเกอร์

8.8 ล้าง (rinse) ชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำ 100 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จำนวน 2 ครั้ง แยกเป็นเวลาครั้งละ 1 นาที

8.9 ใช้มือบีบชิ้นงานทดสอบเพื่อให้เหลือปริมาณน้ำน้อยที่สุด

8.10 ในกรณีที่ชิ้นงานทดสอบถูกเย็บทั้ง 4 ด้าน ให้แยกชิ้นงานทดสอบโดยเลาะเส้นด้ายเย็บออก 3 ด้านให้เหลือด้านที่สั้นที่สุดเพียงด้านเดียว

8.11 นำไปแขวนตากที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยให้ผ้า multifiber หรือผ้าขาวสองเส้นใยอยู่ด้านบนในขณะที่แขวน(ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของสีที่อยู่บนชิ้นงานทดสอบ)

8.12 ประเมินชิ้นงานทดสอบหลังจากที่ชิ้นงานทดสอบแห้งแล้ว

- ประเมินผลค่าการเปลี่ยนสีของ(colour change) บนชิ้นงานทดสอบ โดยใช้เกรย์สเกลสำหรับประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของสี
- ประเมินค่าการติดเปื้อนสี(colour Staining) บนผ้า multifiber หรือผ้าขาวสองเส้นใยโดยใช้เกรย์สเกลสำหรับประเมินค่าการติดเปื้อนสี

9. การรายงานผล

9.1 มาตรฐานการทดสอบ

9.2 ระดับการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานทดสอบ และระดับการติดเปื้อนสีบนผ้า Multifiberหรือผ้าขาวสองเส้นใย

9.3 สภาวะการทดสอบ

ตารางที่ 1ค ผลของแคลเซียมต่อความคงทนของการซักของผ้า

ความเข้มข้น	ร้อยละการลดลงความเข้มสีหลังการซัก		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	5.96	2.97	2.72
10.00	4.17	1.21	1.94
20.00	8.70	3.63	5.78
30.00	10.29	3.77	6.66
40.00	10.40	4.37	8.90
50.00	15.63	4.89	10.30
100.00	33.60	6.06	9.00

ตารางที่ 2ค ผลของแมกนีเซียมต่อความคงทนของการซักของผ้า

ความเข้มข้น	ร้อยละการลดลงความเข้มสีหลังการซัก		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	0.89	1.06	3.97
10.00	0.39	3.37	8.43
20.00	0.74	3.63	9.00
30.00	4.85	4.30	11.44
40.00	9.02	4.79	13.62
50.00	15.63	9.62	14.89
100.00	35.93	10.99	17.97

ตารางที่ 3ค ผลของเหล็กต่อความคงทนของการซักของผ้า

ความเข้มข้น	ร้อยละการลดลงความเข้มสีหลังการซัก		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	7.54	0.85	0.69
0.10	6.26	0.57	1.87
0.50	2.44	1.55	3.24
1.00	9.62	3.63	2.08
1.50	9.10	5.38	9.00
2.00	15.63	6.96	14.98
5.00	16.41	8.23	18.41

ตารางที่ 4ค ผลของแมงกานีสต่อความคงทนของการซักของผ้า

ความเข้มข้น	ร้อยละการลดลงความเข้มสีหลังการซัก		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	3.32	0.59	0.48
0.10	6.55	0.54	4.18
0.05	8.01	0.87	5.60
1.00	10.60	1.08	6.76
1.50	15.63	0.99	8.41
2.00	15.17	3.63	9.00
5.00	19.67	10.46	12.06

ตารางที่ 5ค ผลของทองแดงต่อความคงทนของการซักของผ้า

ความเข้มข้น	ร้อยละการลดลงความเข้มสีหลังการซัก		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีน้ำเงิน	สีแดง	สีเหลือง
0.00	5.30	0.83	1.16
0.10	3.66	0.06	5.44
0.05	11.50	0.23	4.56
1.00	12.40	1.77	6.89
1.50	12.54	3.63	8.37
2.00	13.62	6.75	9.00
5.00	15.63	11.54	9.78