



วิทยานิพนธ์

การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์ของผ้าไหมและ
การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

INVESTIGATION INTO THE IMPROVEMENT OF
SYNTHETIC DYE TREATMENT OF SILK FABRIC AND
WASTE WATER TREATMENT BY ACTIVATED CARBON

นางสาวกุลลดา เอกบุญชู

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

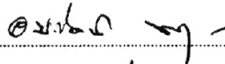
เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์ของผ้าไหมและการบำบัดน้ำเสีย
โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Investigation into the Improvement of Synthetic Dye Treatment of Silk Fabric and
Waste Water Treatment by Activated Carbon

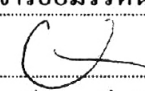
นามผู้วิจัย นางสาวกุลลดา เอกบุญชู

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

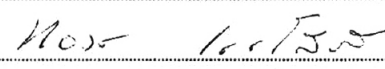
ประธานกรรมการ

()
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อมรรัตน์ พรหมบุญ, Ph.D.

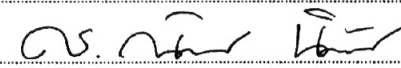
กรรมการ

()
รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตังคณารักษ์, Ph.D.

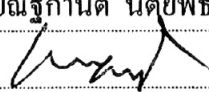
กรรมการ

()
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทองดี เล็กโสภิ, Ph.D.

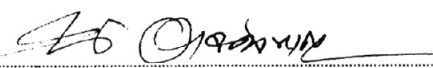
กรรมการ

()
อาจารย์ณัฐกานต์ นิตยพันธ์, Ph.D.

ประธานสาขาวิชา

()
ศาสตราจารย์เกษม จันทรแก้ว, Ph.D.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

()
รองศาสตราจารย์วันชัย อางคงหาญ, M.A.

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 5 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์ของผ้าไหมและการบำบัดน้ำเสีย
โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Investigation into the Improvement of Synthetic Dye Treatment of Silk Fabric and
Waste Water Treatment by Activated Carbon

โดย

นางสาวกุลลดา เอกบุญชู

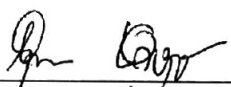
เสนอ

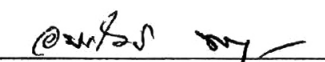
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2550

กุลลดา เอกบุญชู 2550: การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์ของผ้าไหมและ
การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อมรรัตน์ พรหมบุญ, Ph.D. 117 หน้า

การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์ของผ้าไหม พบว่า การฟอกขาวแบบ
ออกซิเดทิฟ ทำให้ความขาวเพิ่มขึ้น แต่ความคงทนต่อการซักและความคงทนต่อแรงเสียดสี
ลดลง ในกระบวนการย้อมสีไหม ที่ pH 5.5 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้
สีย้อมรีแอคทีฟ คือ Cibacron Navy, Cibacron Blue และ Cibacron Red และสีแอซิด คือ Lanaset
Grey และ Erionyl Red โดยพบว่าผ้าไหมที่ย้อมสีร่วมกับอะซิเตดบัพเฟออร์และกรดซิตริก มี
ประสิทธิภาพการติดสีของผ้าไหมดีขึ้น การทดสอบความคงทนต่อการซัก มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ
10.31, 8.73, 0.63, 9.76 และ 7.64 ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการคืนตัวต่อการซักมีค่า
เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.33, 14.53, 16.90, 20.60 และ 23.25 ตามลำดับ นอกจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ
ความคงทนของสีต่อการซัก ในสีย้อม Lanaset Grey และ Erionyl Red ด้วย

สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าไหมโดยวิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
พบว่า ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min. ถ่านกัมมันต์สูง 50 และ 100 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการ
บำบัดสูงสุด ในช่วง 10 นาทีแรก โดยสามารถลดค่า COD ได้สูงสุดร้อยละ 36.63 และ 34.06
ตามลำดับ และลดความเข้มข้นสีได้ร้อยละ 60 และ 80 ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 7.3 ml/min
สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 24.97 และ 29.34 ตามลำดับ และลดความเข้มข้นสีได้ร้อยละ 50 และ
70 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงและเริ่มคงที่ ทั้งนี้ น้ำเสียประกอบด้วยน้ำสี กรด
ซิตริก และอะซิเตดบัพเฟออร์ ซึ่งมีค่า COD เท่ากับ 81.25, 298.33 และ 3,608.33 mg/L ดังนั้น น้ำเสีย
มีค่า COD สูง เนื่องจากกรดซิตริกและอะซิเตดบัพเฟออร์ ซึ่งสารทั้งสองนี้เป็นสารอินทรีย์ จึงต้องม
การใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ COD ในน้ำเสีย
ต่อไป


ลายมือชื่อนิสิต


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

29 / พ.ค. / 2550

Kullada Eakboonchoo 2007: Investigation into the Improvement of Synthetic Dye Treatment of Silk Fabric and Waste Water Treatment by Activated Carbon.
Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science,
College of Environment. Thesis Advisor: Assistant Professor Amornrat Promboon,
Ph.D. 117 pages.

The aim of this research was to study the effects of bleaching and dyeing with crosslinking agent on physical properties and dyeing fixation of silk fabric. The silk fabric sample was oxidative bleached and then it was dyed with synthetic dyes and citric acid as a crosslinking agent at pH 5.5 and a temperature of 80°C for 1 hour. The results illustrated that the dyed silk fabric with Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey and Erionyl Red in combination with citric acid increased in percent of dyeing fixation, abrasion resistance crease recovery and color fastness to washing of the dyed fabric sample with Lanaset Grey and Erionyl Red.

Subsequently, wastewater of silk dyeing was treated by using activated carbon absorption process. It was operated at the overflow rate 4.7 ml/min with 50 cm and 100cm of activated carbon column. The result showed that depth yielded the best efficiency treatment at 10th minutes to remove dye of 50% and 70% respectively and remove COD of 24.97% and 29.34% respectively. Therefore that treatment wastewater from the dyeing of silk fabric by activated carbon should be used in conjunction with other system of treatment to ensure efficient removal of organic pollutant from the wastewater.

KULLADA EAKBOONCHOO

Student's signature

Amornrat Promboon 29 / 05 / 2007

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อมรรัตน์ พรหมบุญ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำในทุก ๆ เรื่องและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทองดี เล็กโสภี ดร. ญัฐกานต์ นิตยพันธ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัจญา สิริวิทยาปกรณ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี และส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการศึกษาวิจัยทางด้านสิ่งทอ และเจ้าหน้าที่ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณภาควิชาชีวเคมี และน้องๆ สมาชิกห้องปฏิบัติการทุกคน สำหรับการให้ความช่วยเหลือ และมิตรภาพที่ดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เกษม จันทร่แก้ว ผู้อำนวยการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และคณาบดีวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม รวมทั้งคณาจารย์วิทยาลัยสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ขอขอบคุณ.ต่อ พี่ชาตรี พี่เอก พี่บุตร พี่ไพบ์ พี่สีห์ พี่แะ พี่เอหนึ่ง หม่อง และชาวโครงการฯแหลมผักเบี้ยทุกท่านที่เป็นกำลังใจ ขอขอบคุณหม่อม แอร์ น้องแพร์ ที่เป็นกำลังใจและกำลังใจดีๆ ขอขอบคุณชาวสิ่งแวดล้อมรุ่น 26, 27 และ 28 ที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จครั้งนี้ ขอขอบคุณตักที่เป็นกำลังใจและเพื่อนที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณเกื้อ วรรณ เปิ้ล เอ้ โอ้ ป๊ว ปู สำหรับมิตรภาพอันยาวนาน ขอขอบคุณข้าวไข่เจียวที่ให้พลังได้เสมอ และสำคัญที่สุด ขอขอบคุณคุณพ่อศิริชัย คุณแม่ทัศนียา เอกบุญชู พี่กอล์ฟ พี่กานต์ ที่คอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษามาตลอด และสุดท้าย ขอขอบคุณความอดทน ความตั้งใจ และความพยายามของตนเอง จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

กุลลดา เอกบุญชู

พฤษภาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	
อุปกรณ์	55
วิธีการ	58
ผลและวิจารณ์	64
สรุปและข้อเสนอแนะ	
สรุป	98
ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	102
ภาคผนวก	109
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดของสารฟอกขาวที่มีผลต่อความขาวของผ้าไหมเกรพ	11
2	ลักษณะของสารฟอกขาวและการประยุกต์ใช้	12
3	การจำแนกประเภทของเส้นใยและการติดสีย้อม	17
4	ประเภทของสีย้อมและการจำแนกตามกรรมวิธีการย้อม	24
5	คุณสมบัติของสีย้อม และการนำไปประยุกต์ใช้ย้อมสีผ้า	26
6	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งโดยวิธีการต่างๆ	42
7	ลักษณะของเส้นด้ายไหมที่ใช้ในงานวิจัย	55
8	ค่าความแตกต่างของสี (CIELAb Color Difference) ของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟและสีแอสิด ร่วมกับกรดซัลฟิวริก	70
9	ค่าความแตกต่างของสี (CIELAb Color Difference) ของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟและสีแอสิด ร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก	77
10	ความแตกต่างของสี (CIELAb Color Difference) ของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วย สี Cibacron Blue ที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก	80
11	ค่าความชันและจุดตัดแกน y ของไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมแบบ Freundlich isotherm และ Langmuir isotherm โดยถ่านกัมมันต์	82
12	ปริมาณ COD ของสารเคมี ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำเสีย	97

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การผลิตและองค์ประกอบของเส้นใยไหม (Fibroin) ในเซลล์ของต่อมไหม	4
2	องค์ประกอบของเส้นใยโปรตีน (Fibroin)	5
3	โครงสร้างของเส้นใยโปรตีนแบบแผ่นพลิเบต้า	5
4	การเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับสีและเส้นใย	20
5	การปรับแต่งเส้นใยเซลลูโลส โดยมี NaH_2PO_4 และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	34
6	สารสร้างพันธะข้าม 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride (Quat-188)	34
7	ขั้นตอนเกิดปฏิกิริยา Carboxymethylation	35
8	การเกิดปฏิกิริยา ไฮคลิกแอนไฮไดรด์ ในการสร้างพันธะระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสกับ BTCA	37
9	หมู่ Carbonyl ของเส้นใยฝ้ายที่อยู่ในรูป a) Ester b) Carboxyl c) Carboxylate	37
10	สารสร้างพันธะข้าม Epoxide EPSIA (Epoxy Silicone Crosslinking Agent A)	39
11	กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างโซเดียมซัลไฟต์ และอาร์จีนิน	41
12	กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างโซเดียมซัลไฟต์ และไลซีน	41
13	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	43
14	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	45
15	แบบจำลอง Langmuir isotherm	48
16	ลักษณะกราฟเส้นตรงตามสมการของ Langmuir	49
17	ลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich	50
18	ลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ที่ความเข้มข้นสารดูดซับต่างๆ	51
19	แสดงเส้นโค้งการหาค่าสภาพในคอลัมน์	52
20	ระบบบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษา โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	62
21	ผลของการฟอกขาวต่อความขาวของผ้าไหม	65
22	ผลของการฟอกขาวต่อความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหม	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ผลของการฟอกขาวต่อความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหม	66
24	ผลของการฟอกขาวต่อความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหม	67
25	เปอร์เซ็นต์การติดสีของผ้าไหม ที่ผ่านการย้อมสี และย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม	69
26	ค่าความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหมจากการย้อมสีและย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม	72
27	ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสี หลังจากทดสอบความคงทนต่อการขัดถู	73
28	ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสีร่วมกับกรดซิดริก 3% o.w.f หลังจากทดสอบความคงทนต่อการขัดถู	73
29	ค่าความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมจากการย้อมสีและการย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม	74
30	ค่าความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมจากการย้อมสี และการย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม	75
31	ค่าความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหมที่ย้อมสีที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง	78
32	เปอร์เซ็นต์การคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมที่ย้อมสีที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง	79
33	ค่าความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมที่ย้อมสีที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง	79
34	ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับ โดยถ่านกัมมันต์ ที่จุดสมดุล	81
35	การดูดซับสีย้อม Cibacron Navy ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm (ข) Langmuir isotherm	83
36	การดูดซับสีย้อม Cibacron Blue ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm (ข) Langmuir isotherm	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	การดูดซับสีย้อม Cibacron Red ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm (ข) Langmuir isotherm	84
38	การดูดซับสีย้อม Lanaset Grey ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm (ข) Langmuir isotherm	85
39	การดูดซับสีย้อม Erionyl Red ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm (ข) Langmuir isotherm	85
40	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 620 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.	88
41	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 620 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min.	88
42	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 548 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.	89
43	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 548 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min	89
44	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 525 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.	90
45	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 525 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min	90
46	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 436 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min	91
47	ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 436 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min	91
48	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลและที่เวลาต่างๆ	92
49	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของน้ำย้อม เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min ณ เวลาต่างๆ	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของน้ำย้อม เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ สูง 50 และ 100 เซนติเมตรที่อัตราการไหล 7.3 ml/min ณ เวลาต่างๆ	94
51	การเปลี่ยนแปลงค่า pH เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min ณ เวลาต่างๆ	95
52	การเปลี่ยนแปลงค่า pH เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min ณ เวลาต่างๆ	96
ภาพภาคผนวกที่		
1	ลักษณะแนวเกลียวแบบ S และ แบบ Z	110
2	(ก) Roaches Beaker Dyer (single bath PYROTECS , Model T.P.C. 1001)	111
	(ข) กระบอกเหล็ก ขนาด 200 มิลลิลิตร ที่ใช้ในการย้อม	111
3	(ก) เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก	113
	(ข) กระบอกซักที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก	113
4	(ก) เครื่องทดสอบความคงทนต่อการขัดถู Martindale M235	114
	(ข) abrasion holder เพื่อจะทำการทดสอบ ความคงทนต่อการขัดถู	114
5	(ก) เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงฉีกขาด ทดสอบได้ด้วย Elmendorf Tearing Tester	115
	(ข) ตูมน้ำหนัก (pendulum) และแม่พิมพ์ในการตัดผ้าให้ได้ตามขนาด	115
6	เครื่องทดสอบการคืนตัวจากการยับ Shirley Crease Recovery Tester	116

การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์ของผ้าไหมและการบำบัดน้ำเสีย โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Investigation into the Improvement of Synthetic Dye Treatment of Silk Fabric and Waste Water Treatment by Activated Carbon

คำนำ

ปัจจุบันได้มีการส่งเสริมการผลิตผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบภายในท้องถิ่น เพื่อเป็นการสร้างรายได้แก่ชุมชนและสามารถจำหน่ายเป็นสินค้าส่งออก นำรายได้เข้าสู่ประเทศได้ ซึ่งผ้าไหมจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตในชุมชนไทยเป็นเวลายาวนาน และยังเป็นสิ่งที่ล้าค่ามากกว่าสิ่งทอประเภทอื่น โดยได้รับสมญานามว่า “ราชินีแห่งเส้นใย” ซึ่งแสดงถึง วิถีชีวิต ภูมิปัญญา ศิลปวัฒนธรรม ของแต่ละชุมชน ที่ถูกถ่ายทอดผ่านการทอผ้าและการทำลวดลายของผ้า จนมีความงดงามเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละท้องถิ่น และได้รับความนิยมทั้งในและต่างประเทศ สำหรับกระบวนการผลิตเริ่มจากการการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม การสาวไหม การฟอกขาวและการย้อมสีไหม การออกแบบ และการทอผ้าไหม ซึ่งในกระบวนการฟอกขาวและการย้อมสีไหมนั้นจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ต้องผ่านความร้อน ทำให้เส้นใยไหมถูกทำลาย ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใย และลักษณะทางเคมีกายภาพของเส้นใยไหม ในงานวิจัยนี้ผู้ศึกษาวิจัยจึงสนใจทำการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไหม โดยการเติมสารสร้างพันธะข้าม (Crosslinking agent) เพื่อการซ่อมแซมพันธะเปปไทด์ที่ถูกไฮโดรไลส์ หรือถูกทำลายในกระบวนการฟอกขาวและการย้อม เพื่อเพิ่มสมบัติความแข็งแรงของเส้นใยไหม และเพิ่มสมบัติการติดสีของผ้าไหม ตัวอย่าง เพื่อลดปัญหาสีตกของผ้าไหม ที่เป็นปัญหาสำคัญในการผลิตผ้าไหมคุณภาพ

การย้อมสีผ้าไหม หากจัดแบ่งตามแหล่งกำเนิดของสีจะแยกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การย้อมด้วยสีธรรมชาติและการย้อมด้วยสีสังเคราะห์ และมากกว่าร้อยละ 95 ที่การย้อมสีไหมใช้สีสังเคราะห์ เนื่องจากเป็นสีที่ย้อมติดได้ดี มีความคงทนต่อการซักล้างและแสงแดด วิธีการย้อมสีสะดวกและรวดเร็ว แต่น้ำที่เหลือจากกระบวนการย้อมสีไหมนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะต่อมลพิษทางน้ำ และจากงานวิจัยที่ได้มีผู้ศึกษามาก่อน พบว่า สีสังเคราะห์จะสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการผลิตประมาณร้อยละ 12 และสีที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย จะปนเปื้อนสู่

สิ่งแวดล้อมประมาณร้อยละ 20 ทั้งนี้เนื่องจากสีข้อมที่ปนเปื้อนนี้จะบดบังการส่องผ่านของแสง ทำให้แสงส่องผ่านลงสู่ได้ผิวน้ำได้น้อยลง ส่งผลต่อพืชน้ำซึ่งจะสามารถสังเคราะห์แสงได้น้อยลง ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์ของพืชและจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของ สิ่งมีชีวิตได้น้ำลดลง สิ่งมีชีวิตได้น้ำไม่สามารถดำรงอยู่ได้ นอกจากนี้สีสังเคราะห์มีโลหะหนัก จำพวก โครเมียม ตะกั่ว และดีบุกเป็นองค์ประกอบ หากไม่มีการบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสีสังเคราะห์และโลหะหนักสามารถสะสมใน สิ่งแวดล้อมและในสิ่งมีชีวิตได้ และจะเพิ่มขึ้นตามลำดับชั้นในห่วงโซ่อาหาร (Food chain) ของ ระบบนิเวศ (Ecosystem) อันจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ในที่สุด

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาโดยแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ ในขั้นแรกจะเป็นการศึกษาสมบัติ ทางกายภาพและการติดสีของผ้าไหมโดยผ่านการฟอกขาว การข้อมสี และการข้อมสีผ้าไหมร่วมกับ กรดซิตริก ซึ่งเป็นสารสร้างพันธะข้าม เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารสร้างพันธะข้ามต่อสมบัติทางเคมี กายภาพของเส้นใยไหม และการติดสีของผ้าไหมตัวอย่าง ส่วนในขั้นที่สองเป็นการศึกษาการบำบัด น้ำจากกระบวนการข้อมสีไหมด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โดยใช้ระบบบำบัดอย่างง่าย เพื่อเป็นแนวทางให้ชุมชนสามารถนำไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียจากกระบวนการข้อมสีผ้าไหมได้ ต่อไป

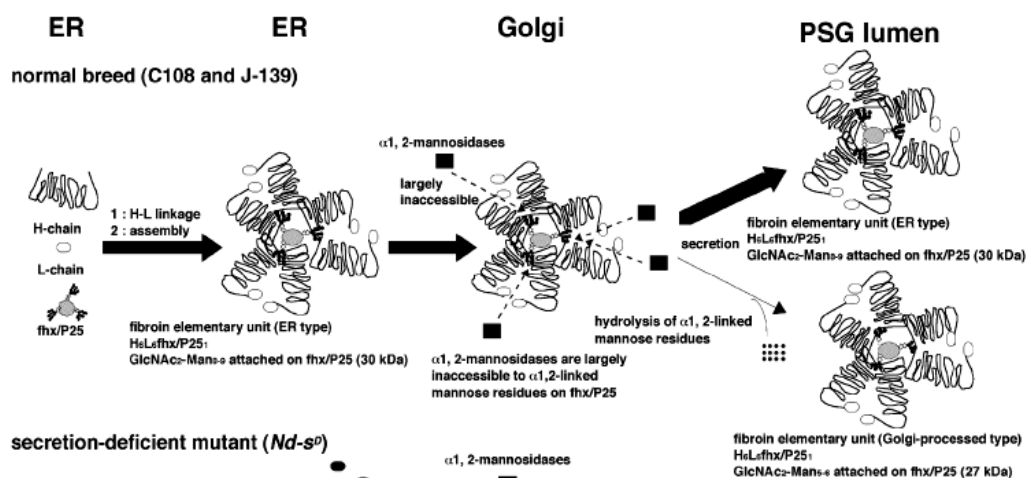
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของผ้าไหมไทยที่ผ่านการฟอกขาว การย้อมด้วยสีสังเคราะห์ ได้แก่ สีรีแอคทีฟ และสีแอซิด
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นสารสร้างพันธะข้าม ต่อสมบัติการติดสี ความคงทนของสี และต่อสมบัติทางกายภาพของผ้าไหมไทย
3. เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำจากกระบวนการย้อมผ้าไหม โดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

การตรวจเอกสาร

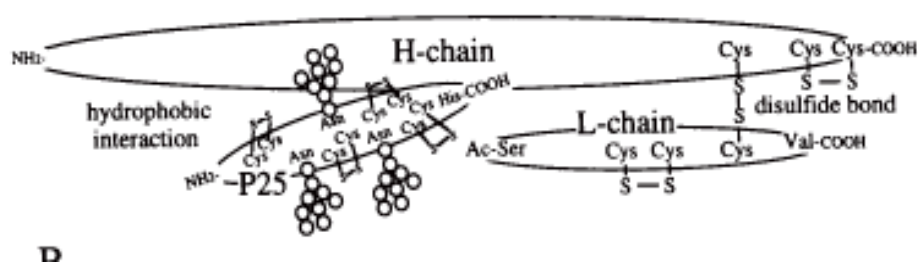
ไหม (Silk) เป็นเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ เส้นใยไหมประกอบด้วยโปรตีน 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเส้นใยไหม เรียกว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) ซึ่งเป็น Fibrous protein ส่วนโปรตีนเซรีซิน (Sericin) มีลักษณะเหนียวเหมือนกาวช่วยยึดเส้นใยไหมสองเส้นไว้ด้วยกัน โปรตีนของไหมประกอบด้วยกรดอะมิโนเกาะกันเป็นสายพอลิเพปไทด์ (Polypeptide chain) (โมโตอิและคณะ, 2530; วีระศักดิ์, 2003) และมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย ไฟโบรอินร้อยละ 70 เซรีซินร้อยละ 20-30 เส้นใยไหมทั้งไฟโบรอินและเซรีซิน ประกอบด้วยกรดอะมิโน 16-18 ชนิด สำหรับไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนหลักที่สำคัญ 4 ตัว คือ ไกลซีน (Glycine) อะลานีน (Alanine) เซอรีน (Serine) ไทโรซีน (Tyrosine) ซึ่งทำให้เส้นใยไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลมาก (โมโตอิและคณะ, 2530)

โดยมีการศึกษาวิจัยโครงสร้างของเส้นใยโปรตีนไฟโบรอิน ซึ่งผลิตจากต่อมไหมส่วนท้าย (Posterior Silk Gland: PSG) ของตัวไหม ดังภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบสายพอลิเพปไทด์ 3 ประเภท คือ heavy (H-) chain มีขนาด 350 kDa, light (L-) chain ขนาด 25 kDa และ fibrohexamerin (fhx) หรือ เรียกว่า P25 ขนาด 30 kDa โดย H-chain และ L-chain เชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์แบบ Disulfide linkage ส่วน P25 ซึ่งเป็นโปรตีนประเภทไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) เชื่อมกันด้วยพันธะ hydrophobic interaction (Tanaka *et al.*, 1999; Inoue *et al.*, 2004)



ภาพที่ 1 การผลิตและองค์ประกอบของเส้นใยไฟโบรอิน ในเซลล์ของต่อมไหม

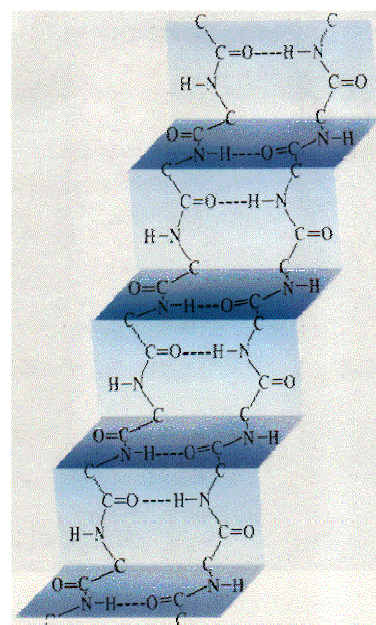
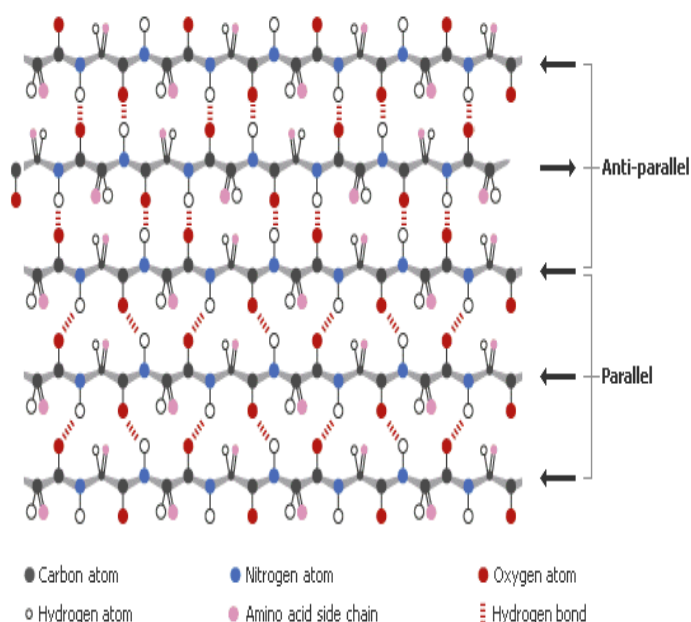
ที่มา: Inoue *et al.* (2004)



ภาพที่ 2 องค์ประกอบของเส้นใยไฟโบรอิน

ที่มา: Tanaka *et al.* (1999)

โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไฟโบรอินของไหม เป็นโครงสร้างโปรตีน (Structure protein) ซึ่งไม่ละลายน้ำ และมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นพับลิทเบต้า (β-pleated sheet) แบบ Antiparallel แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่างเส้นพอลิเพปไทด์ ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอมิโนของกรดอะมิโนตัวถัดไป โดยเส้นพอลิเพปไทด์เหล่านี้มีการเหยียดตัวเต็มที่ ทำให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นหรือรูปซิกแซก ส่งผลให้เส้นใยไหมมีความแข็งแรง และสามารถยืดตัวออกได้ประมาณร้อยละ 20 ส่วนเซรีซินมีลักษณะเป็นก้อนกลม ซึ่งสามารถละลายน้ำได้



ภาพที่ 3 โครงสร้างของเส้นใยไฟโบรอินแบบแผ่นพับลิทเบต้า

การเรียงตัวของโมเลกุลในเส้นใยไหมเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบดีมาก ทำให้ไหมมีคุณสมบัติเหนียวมาก ไหมดูดซับน้ำได้ดีจึงทำให้ไหมย้อมสีติดง่าย โดยไหมมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับขนสัตว์และฝ้าย และมีความคงรูปดีไม่ยืดไม่หดมากนัก เมื่อซักจะคืนตัวได้ปานกลาง นอกจากนี้ไหมสามารถทนความร้อนได้ถึง 135°C และค้างเข็มขึ้นเป็นอันตรายต่อไหม กรดเข็มขึ้นและกรดเกลือทำให้ไหมละลาย กรดของโลหะอื่นๆ และแสงแดดทำให้ไหมเสื่อมคุณภาพไหมเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี จึงเกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย (Corbman, 1975)

1. สมบัติของเส้นไหม

1.1 สมบัติทางกายภาพ (วีระศักดิ์, 2543; Leksophee *et al.*, 2004)

1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะภายนอก ไหมดิบจะเป็นลักษณะของเส้นใยคู่เกาะติดกันด้วยกาวไหม ผิวนอกดูเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย หลังจากลอกกาวไหมออกแล้วจะเป็นเส้นใยเดี่ยว เรียบ สม่ำเสมอและโปร่งแสง พื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ 11–12 ไมครอน มีความละเอียดสูง ขนาด 1.25 ดีเนียร์ต่อเส้น

1.1.2 ความยาว ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว (Filament) ความยาวทั่วไปอยู่ระหว่าง 400 – 700 เมตร

1.1.3 สี รังไหมมีสีแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์ไหม ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ สิ่งแวดล้อม คุณภาพของอาหารและการเจริญพันธุ์ของตัวหนอนไหม สีเหล่านี้เกิดจากเม็ดสีที่มีขนาดเล็กมาก โดยจะมีทั้งชนิดที่ละลายน้ำได้และชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนใหญ่อยู่ในส่วนกาวไหม

1.1.4 ความเงามัน (Luster) ไหมจะมีความเงามันมาก หลังจากลอกกาวไหมออกแล้ว

1.1.5 ความถ่วงจำเพาะ ไหมมีความถ่วงจำเพาะ 1.25 ซึ่งน้อยกว่าฝ้าย ป่าน และขนสัตว์

1.1.6 ความร้อน ไหมสามารถทนความร้อนได้ถึง 170°C ในระยะเวลาสั้น เนื่องจากเป็นเส้นใยโปรตีนจึงกระด้าง เปราะ และหลอมง่าย (วีระศักดิ์, 2003)

1.1.7 การดูดความชื้น (Moisture regain) ดูดความชื้นได้ 11% ที่อุณหภูมิ 21 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% ดูดความชื้นได้ดี ทำให้การดูดซับสีย้อม สีพิมพ์เป็นไปได้ดี

1.2 สมบัติเชิงกล (วีระศักดิ์, 2543; Leksophee *et al.*, 2004)

1.2.1 ความแข็งแรง (Strength) ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นไหม และมีค่าทนแรงดึง เมื่อเปียกจะมีความแข็งแรงลดลงประมาณร้อยละ 15-25

1.2.2 การยืดหยุ่น (Elasticity) ยืดหยุ่นได้ดี สามารถยืดได้ร้อยละ 20 ของความยาวเดิม แต่ไม่ดีเท่าขนสัตว์ เนื่องจากโครงสร้างทางโมเลกุลของไหมไม่มีพันธะจับเชื่อมเป็นโครงข่ายด้านข้าง จึงไม่สามารถดึงกลับคืนสภาพเดิมได้ทั้งหมด

1.2.3 การคืนตัว (Resiliency) การคืนตัวจากแรงยืดหยุ่นอยู่ในระดับค่อนข้างดี การคืนตัวหลังการยับดีพอสมควร แต่ไม่ดีเท่าขนแกะ

1.2.4 ความคงทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance) อยู่ในระดับปานกลาง

1.3 สมบัติทางเคมี (วีระศักดิ์, 2543; Leksophee *et al.*, 2004)

1.3.1 กรด กรดทั่วไปจะไม่ทำลายเส้นใยไหม แต่กรดแก่เข้มข้นจะทำลายเส้นใยไหม เช่น กรดดินประสิว ทำให้ผ้าไหมเป็นสีเหลือง

1.3.2 ด่าง เส้นใยไหมมีความทนต่อด่างได้ดีกว่าเส้นใยขนสัตว์ แต่อาจถูกทำลายด้วยด่างแก่และอุณหภูมิที่สูงพอ เช่น โซดาไฟ (5%) ร้อน เป็นต้น ด่างแก่มีผลทำให้ความเงาลดลง ผ้าไหมบางชนิดอาจซักด้วยน้ำสบู่อ่อนและการซักที่รุนแรงได้ การรีดจะต้องมีผ้าป้องกันบนผ้าไหม และมีความชื้นที่เหมาะสม (Corbman, 1975; วีระศักดิ์, 2003)

1.3.3 เกลือคลอไรด์ ไหมสามารถถูกทำลายด้วยสารที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหมือ สารดับกลิ่น น้ำทะเล และน้ำเกลือ โดยเฉพาะเหมือทำให้เกิดรอยเปื้อนได้ง่าย

1.3.4 สารฟอกขาว เช่น พวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรท์ผสมอยู่ ทำให้ความเหนียวและความแข็งแรงลดลง แต่สารฟอกขาวประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือเปอร์คลอเรต จะไม่เกิดผลเสียต่อไหมภายใต้ภาวะการฟอกขาวปกติ

1.3.5 ตัวทำลายอินทรีย์ ไหมสามารถทนต่อตัวทำลายทุกชนิด ดังนั้นตัวทำลายในน้ำยาซักแห้งจึงไม่มีผลเสียต่อเส้นไหม

1.3.6 แสง ไหมทนต่อแสงได้ดีกว่าไหมที่ลอกกาแล้ว แต่การถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานาน ไหมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากโปรตีนถูกทำลาย

1.3.7 สีย้อม ไหมมีความสามารถติดสีย้อมได้ดี เนื่องจากดูดซึมความชื้นได้สูง ไหมสามารถดูดซึมสีได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นใยขนสัตว์ สีที่ย้อมได้แก่ สีแอซิด สีเบสิก สีไคเร็กซ์ (Corbman, 1975; วีระศักดิ์, 2003) และสีรีแอคทีฟ (Leksophee *et al.*, 2004)

1.4 สมบัติอื่น (วีระศักดิ์, 2543; Leksophee *et al.*, 2004)

1.4.1 สมบัติทางชีวภาพ ไหมสามารถทนเชื้อราได้ดี เชื้อราจะทำลายไหมในสภาพที่รุนแรงเท่านั้น แมลงไม่ทำลายผ้าไหมที่สะอาด แต่หากมีสิ่งสกปรกติดอยู่ก็จะถูกแมลงกัดกินได้

1.4.2 สมบัติในการติดไฟ เมื่อติดไฟจะลุกขึ้นช้าๆ และเมื่อนำออกจากแหล่งให้ความร้อน เปลวไฟจะดับได้เอง

1.4.3 สมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อน ไหมเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี จึงสามารถสะสมประจุไฟฟ้าสถิตได้มาก และยังเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี จึงเก็บความอบอุ่นได้นาน

2. การตกแต่งสำเร็จ (Fabric finishing)

การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ หมายถึง การกระทำด้วยวิธีการใดๆ กับเส้นใย เส้นด้าย หรือผ้า ก่อนหรือหลังการผลิตเป็นผืน เพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะที่เห็นและสัมผัสให้ดีขึ้น และสมบัติที่ดีในด้านต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมในการใช้ประโยชน์ต่อไป

2.1 การลอกขาว (Degumming) (Leksophee *et al.*, 2004)

การลอกขาว คือ การนำเส้นใยไหม เส้นด้าย หรือผ้าไหมดิบมาลอกขาวเซรีซินที่เคลือบผิวของเส้นใย และเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดเส้นใย ซึ่งจะช่วยทำให้การฟอกขาวและย้อมสีเส้นใยเกิดได้ดีและทำให้ไหมมีความมันเงา

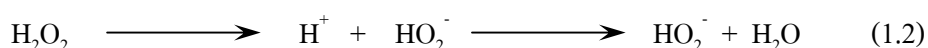
2.2 การฟอกขาว (Bleaching) (โมโตอิ และคณะ, 2530; Vigo, 1994; กลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ (เคมีสิ่งทอ), 2001; Leksophee *et al.*, 2004)

การฟอกขาว คือ การกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น เป็นขั้นตอนที่สำคัญโดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และผ้าที่จะนำไปย้อมเป็นสีอ่อน เพื่อให้ได้สีที่สดและสีไม่ผิดไปจากสีที่ใช้

2.2.1 การฟอกขาวแบบออกซิเดทีฟ (Oxidative bleaching)

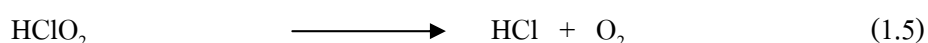
1) การฟอกขาวด้วยเพอร์ออกไซด์ การฟอกขาวโดยใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แตกตัวได้สารที่เรียกว่า Active oxygen คือ เพอร์ไฮดรอกซิลอออน (HO_2^-) ซึ่งสามารถทำลายสารมีสีได้ดังสมการที่ (1.1) และ (1.2) ซึ่งค่าจะเป็นตัวเร่งให้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สลายตัวเร็วขึ้น จึงต้องเติมสารชะลอตัว (Peroxide stabilizer) ให้พอเหมาะ อีออนของโลหะอาจเร่งการสลายตัว เช่น อีออนของเหล็ก อีออนของทองแดง จึงต้องเติมสารที่สามารถจับอีออน ที่ pH สูงๆ เพอร์ไฮดรอกซิลอออนจะแตกตัวเร็วขึ้น เกิดความไม่คงตัวและเกิดก๊าซออกซิเจน ไม่เกิดการฟอกขาว หากอัตราการสลายตัวของเพอร์ไฮดรอกซิลอออนสูง อาจทำลายเส้นใยไหม

ข้อดีของการฟอกขาวด้วยเพอร์ออกไซด์ คือ สามารถใช้กับเส้นใยโปรตีนได้ ไม่ทำให้เส้นใยเหลือง ไม่เป็นพิษและไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งทอที่ฟอกขาวหรือเครื่องมือ ข้อเสีย คือ จะเกิดรูเล็กๆ บนผ้าถ้ามีอีออนของโลหะในกระบวนการ



2) การฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรท์ สารประกอบคลอไรท์ที่ใช้ในการฟอกขาว คือ โซเดียมคลอไรท์ (NaClO_2) คลอไรท์จะทำการฟอกได้ดีที่ pH 3-4 และจะเกิดก๊าซพิษขึ้นมา คือ ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะสูงมาก ดังสมการ (1.3), (1.4) และ (1.5)

ข้อดีของคลอไรท์ คือ ให้ความขาวมาก ไม่ทำลายเส้นใยหรือทำลายน้อย ข้อเสีย ไม่เหมาะกับเส้นใยโปรตีน ระหว่างการฟอกขาวจะมีก๊าซพิษเกิดขึ้น ทำให้ความขาวไม่ถาวร

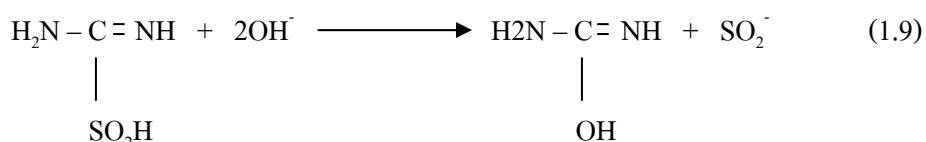


2.2.2 การฟอกขาวแบบรีดักทีฟ (Reductive bleaching)

การฟอกขาวแบบรีดักทีฟด้วยไฮโดรซัลไฟท์ ปฏิกริยารีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอนุมูลสูงขึ้น ดังสมการที่ (1.6), (1.7) และ (1.8)



ไฮโดรเจนซัลไฟท์เป็นสารที่ไม่คงรูป โดยเฉพาะเมื่อนำมาทำเป็นสารละลาย ทำให้การฟอกขาวไม่สม่ำเสมอ จึงใช้โซเดียมไดออกไซด์แทนไฮโดรซัลไฟท์ เมื่อละลายน้ำ ส่วนหนึ่งของโซเดียมไดออกไซด์กลายเป็นฟอร์มาลดีไฮด์ฟีนอล เมื่อมีตัวรีดิวซ์หรือมีการเติมด่างจะให้ซัลไฟเนตไอออน (SO_2^-) เป็นตัวลดสารมีสีในเส้นใย ให้ความคงตัวเพิ่มขึ้นและฟอกขาวได้สม่ำเสมอ แสดงดังสมการที่ (1.9)



กล่าวโดยสรุป วิธีการฟอกขาวที่นิยม คือ การฟอกขาวแบบออกซิเดทีฟด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ โดยใช้เตตระโซเดียมไฟโรสเฟตเป็น Stabilizer จะลดการแยกตัวของออกซิเจน สภาวะที่เหมาะสม คือ pH ระหว่าง 8.5-9 อุณหภูมิ 75-80°C 1-2 ชั่วโมง ดังนั้นผ้าที่ฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จะเกิดความเสียหายทางเคมีน้อยกว่าและให้ปฏิกิริยาการฟอกขาวที่นุ่มนวลกว่า การฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรท์ ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการฟอกขาวด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Peter, 1967)

การฟอกขาวในไหม สามารถทำได้ทั้งการฟอกขาวแบบออกซิเดทีฟ แบบรีดิกทีฟ หรือการฟอกขาวรวมทั้งสองแบบรวมกัน ซึ่งการฟอกขาวแบบรวมนี้จะให้ความขาวสูงกว่า แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของสารฟอกขาวที่มีผลต่อความขาวของผ้าไหมเครพ

ชนิดของสารฟอกขาว		ความขาว (การสะท้อนแสง) Whiteness (Reflection) %
การฟอกขาวแบบรีดิกทีฟ	ไฮโดรซัลไฟท์	80.30
	โซเดียมไฮโปคลอไรท์	83.50
การฟอกขาวแบบออกซิเดทีฟ	ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	86.20
	โซเดียมเพอร์โบเรต	81.60
	กรดเพอร์อะซิติก	73.40
การฟอกขาวแบบรีดิกทีฟ และออกซิเดทีฟ	ไฮโดรซัลไฟท์ และ	86.70
	ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	
	โซเดียมไฮโปคลอไรท์และ	86.50
	ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	
ไม่ฟอกขาว		79.00

ที่มา: โมโตอิ และคณะ (2530)

ตารางที่ 2 ลักษณะของสารฟอกขาวและการประยุกต์ใช้

Bleaching agent	Application	Characteristics	Auxillary agents need
Hydrogen Peroxide: H_2O_2	All kind of natural animal and vegetable fibers, as well as for many man-made fibers: Mainly cotton; cotton/wool	Most importance bleaching agent a wide range of bleaching process can be used (cold pad batch, bleaching under streaming conditions, impregnating methods, bleaching in a long bath, etc.) Ecological favourable: the decomposition of hydrogen peroxide which take place during the bleaching process forms only water and oxygen Effect achieved: Seed husks are mostly completely removed (yet, prior scouring remain necessary); Residual size and its degradation products are hydrolysed, oxidized and removed; Whiteness is achieved with the minimum decrease in the DP value (degree of polymerization of the cellulose);	The textile is treated in a solution containing H_2O_2, caustic soda and: Stabilizers: sodium silicate together with Mg salts ($MgCl_2$ or $MgSO_4$) and sequestering/complexing agents (EDTA, DTPA, NTA, gluconates, phosphonates and polyacrylates); Surfactants with emulsifying, dispersing and wetting properties, usually mixtures of anionic compounds (alkyl sulphonates and alkyl aryl sulphonates) with non-ionic compounds (alkylphenol ethoxylates or fatty alcohol ethoxylates). Bleaching in weekly acidic conditions (pH range 6.5-8) is also possible: - For alkali-sensitive fibers (e.g. cotton/wool blends) - As dyed yarns are bleached

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Bleaching agent	Application	Characteristics	Auxillary agents need
		Absorbance of the material is made uniform.	- After bleaching with hypochlorite in order to save water in the subsequent washing process
Sodium hypochlorite: NaOCl	Cotton (mianly yarn and knitted fabrics) linen (flax)	Cheap bleaching mehod Pre-bleach treatment for cotton, with a peroxide bleaching following (as a high bleaching degree is need) In decline for ecological reasons the process must be carried out at room temperature because of the high reactivity of the hypochlorite fiber damage may be minimized by operating at lower hypochlorite concentration, in pH range 9.0-11.5	Precise control of pH and reaction time is necessary: Buffer: caustic soda addition of sodium chloride to allow higher hypochlorite concentration smooth water has to be used to prepare the bleaching bath. This avoid the precipitation of insoluble chlorines released by that kind of bleaching
Sodium chlorite: NaClO ₂	Cotton, Linin, Flax, Jute, other cellulose	Fiber damage is limited by applying this treatment when used in combination with hydrogen peroxide bleaching (before or after) high reflectance is obtained in decline	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Bleaching agent	Application	Characteristics	Auxillary agents need
Sodium chlorite: NaClO_2	fibers (CO/PES)	for ecological reason Not applicable for continuous open-width process because of the severe corrosivity of sodium chlorine	
Potassium permanganate: KMnO_4	Cotton (mainly jeans treatments)	Rare Applied by stone-washed or snow-washed treatments of jeans	The manganese peroxide hydrate, a brown screed, will remain on the textile and have to be removed after swilling by a second washing with sodium bisulphate
Ozone: O_3	Linen cloth	Old method also called grass bleaching (crafting): a process for bleaching linen cloth after it has been washed by exposing it while spread out on a grass lawn or field known as a green to the action of the elements; special machine called “ozonisor” are used to produce electrically ozone; this bleaching method has no economical relevance	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Bleaching agent	Application	Characteristics	Auxillary agents need
Sodium dithionite: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	Brightness of animal fibers (wool, silk); final bleaching of wool	Most common reductive bleaching agent; Reductive bleaching is less effective than oxidative bleaching, only whiteness of the textile may be obtained; used in combination with other bleaching as a final bleaching treatment; treatment with take place at $70-90^\circ\text{C}$; the reduction products have to be completely washed out of the textile as otherwise a reoxidation of impurities may take place	

ที่มา: Lacasse and Baumann (2004)

3. การย้อมสี (Dyeing)

3.1 ประเภทของสีย้อม แบ่งตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้ (Vigo, 1994; Leksophee *et al.*, 2004)

3.1.1 สีย้อมที่มีหมู่ฟังก์ชันแอนไอออนิก (Anionic functional group) ได้แก่ สีแอซิด (Acid dyes) สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dyes) สีมอร์แดนต์ (Mordant dyes) สีไดเร็กต์ (Direct dyes) และสีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) โดยสีเหล่านี้เมื่อละลายน้ำจะมีประจุลบเป็นส่วนที่ให้อิออน

3.1.2 สีย้อมที่มีหมู่ฟังก์ชันแคตไอออนิก (Cationic functional group) ได้แก่ สีเบสิก (Basic dyes) เมื่อละลายน้ำให้โครงสร้างหลักที่มีประจุบวก

3.1.3 สีย้อมที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีก่อนที่จะนำมาย้อม ได้แก่ สีแวต (Vat dyes) สีซัลเฟอร์ (Sulfur dyes) และอะโซอิก (Azonic) ในสภาวะปกติไม่ละลายน้ำ

3.1.4 สีย้อมที่ย้อมด้วยวิธีเฉพาะและพวกรงควัตถุ ได้แก่ สีดิสเพอร์ส (Disperse dyes) โซลเวนต์ (Solvent) สีธรรมชาติ และพิกเมนต์ (Pigment)

3.2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสีกับเส้นใย (Peter, 1975)

สีและเส้นใยจะมีปฏิสัมพันธ์แตกต่างกันตามชนิดของสีและชนิดของเส้นใย ดังตารางที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม

3.2.1 เส้นใยประเภท Hydrophobic กับสีประเภท Non-Ionic ละลายน้ำได้จำกัด สีที่เกิดปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีดิสเพอร์ส

3.2.2 เส้นใยที่มี Ionic Sites ในโครงสร้าง ได้แก่ ไนลอน ขนสัตว์ เป็นเส้นใยที่มีหมู่อะมิโนและหมู่คาร์บอกซิลจำกัด สีแอซิดสามารถย้อมได้ดี ยึดกันด้วยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างของประจุระหว่างสีกับเส้นใย ทำให้เกิดการติดสีที่ดีกว่าการดูดซับแบบธรรมดา

3.2.3 เส้นใยที่ย้อมด้วยสีประเภทไอออนิก แต่ไม่มี Charged Group เป็นสีที่มีขนาดไอออนใหญ่ ปริมาณเกลือและความเข้มข้นของสีในน้ำย้อม เป็นตัวแปรการย้อมสี

ตารางที่ 3 การจำแนกประเภทของเส้นใยและการติดสีย้อม

General classification of fiber	Fiber	Source	Name	Dyes used
Hydrophilic	Cellulose	Natural regenerated	Cotton, Linen, Jute, Paper, Viscose, Rayon	Direct, Sulphur, Vat, Azoic, Reactive, Metal complex
	Protein (Natural polyamide)	Natural	Wool, Mohair, Angora, Silk	Acid, Reactive, Mordant, Metal complex
Hydrophobic	Polyamide	Synthetic	Nylon	Acid, Mordant, Direct, Dispersed, Reactive, Metal complex
	Polyester	Synthetic	Terylene	Disperse, Azoic, Vat
		Synthetic	Acrylic, Nylon, Dacron	Basic, Disperse
		Synthetic		Disperse, Azoic, Vat
		Synthetic		Disperse, Azoic, Vat

ที่มา: Zollinger (2003)

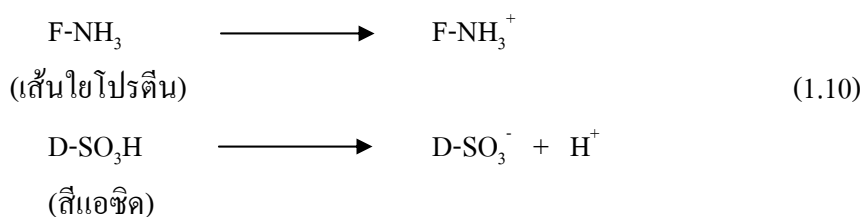
3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใย

3.3.1 การเกาะติดโดยอาศัยแรงดึงดูดทางเคมี ได้แก่ แรงดึงดูดภายในโมเลกุล และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

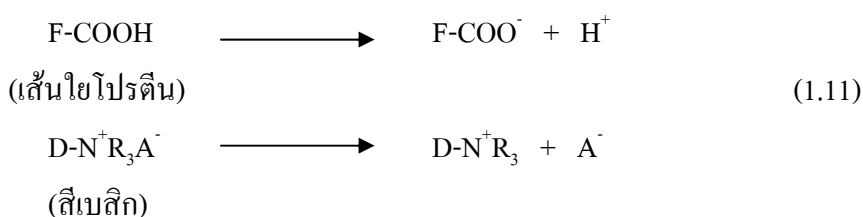
1) แรงดึงดูดภายในโมเลกุล

1.1) Ionic bond เกิดขึ้นเนื่องจากกลุ่มเคมีที่มีประจุต่างกัน เส้นใยเมื่ออยู่ใน

น้ำมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เนื่องจากการแตกตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใย ส่วนใหญ่สีที่ละลายน้ำเป็นแอนไอออน การดูดซับต้องเปลี่ยนประจุในเส้นใย เช่น การเติมเกลือลงในน้ำย้อมเส้นใยเซลลูโลส หรือการเติมกรดลงในน้ำย้อมเส้นใยโปรตีนหรือไนลอน เพื่อเปลี่ยนศักย์ในเส้นใยก่อน แรงดึงดูดนี้จะเกิดในการย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยไนลอนด้วยสีย้อมกรด ดังสมการที่ 1.10 และสีย้อมด่าง ดังสมการที่ 1.11



หรือ



1.2) Covalent bond เป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากการใช้เวเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างเส้นใยและสีย้อม ซึ่งเกิดในการย้อมด้วยสีย้อมแอคทีฟ เป็นพันธะที่มีความแข็งแรง มีพลังงานพันธะสูง ถูกทำลายได้ยาก จึงทำให้สีย้อมมีความคงทนต่อการซักสูงมาก

2) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

2.1) Van Der Waals force เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไม่อยู่นิ่งของอิเล็กตรอนในโมเลกุล แม้ในสารที่เป็นกลางที่โมเลกุลอาจมีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนไม่สมดุลกัน ทำให้เกิดเป็นแหล่งที่มีประจุตรงข้ามและเกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียง แรงดึงดูดประเภทนี้เกิดกับสีย้อมและเส้นใยทุกประเภท ขึ้นกับขนาดพื้นที่สัมผัส ดังนั้นกำลังของแรงดึงดูดจะแปรผันตรงกับขนาดโมเลกุล มีกำลังดึงดูดน้อยที่สุด จึงถูกทำลายได้ง่าย

2.2) Dipole dipole force เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว โดยแต่ละโมเลกุลจะหันขั้วที่ต่างกันเข้าหากัน และมีกำลังดึงดูดสูงกว่าแรง Van Der Waals force

2.3) Hydrogen bond เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นกับสารที่มีไฮโดรเจนอะตอม อยู่ติดกับอะตอมที่มี Electronegativity สูง เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และฮาโลเจน เป็นต้น ใน ลักษณะเช่นนี้ไฮโดรเจนจะมีประจุบวกที่ถาวรและค่อนข้างแรง สามารถเกิดแรงดึงดูดประจุลบของ โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง โดยทั่วไปพันธะไฮโดรเจนจะเกิดกับสี่ข้อมทุกประเภทและมีกำลังแรงกว่า Dipole Dipole Force สี่ข้อมที่มีลักษณะการเกาะติดเส้นใยโดยอาศัยแรงดึงดูดนี้ ได้แก่ สีแอซิด สีเบสิก และสีไคเร็กซ์ แต่จะมีความคงทนต่อการซักไม่สูงมาก เนื่องจากกำลังของแรงดึงดูดทาง กายภาพไม่มาก สามารถถูกทำลายได้ง่าย

3.4 วิธีการย้อม มี 3 แบบ ดังนี้ (Vigo, 1994)

3.4.1 แบบโดยตรง (Direct dyeing)

เส้นใยประเภทเซลลูโลส เช่น ฝ้าย เส้นใยจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups, -OH) อยู่มาก จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของสีได้โดยตรง ส่วนเส้นใย ประเภทพอลิเพปไทด์ เช่น ขนสัตว์หรือไหม ในเส้นใยประกอบด้วยส่วนที่เป็นทั้งหมู่กรด (Acidic groups, -COOH) และหมู่เบส (Basic groups, -NH₂) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่เบสหรือหมู่กรดใน โมเลกุลของสีเกิดเป็นเกลือขึ้น และเกิดการยึดเหนี่ยวแบบไอออนิก

3.4.2 แบบแวต (Vat dyeing)

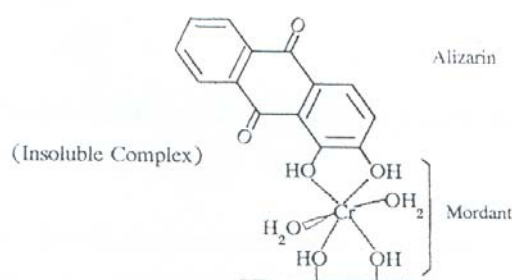
โดยทั่วไปสารที่ให้สีประเภทนี้ไม่ละลายน้ำ ต้องทำการรีดิวซ์สารที่ให้สีเป็น สารที่ละลายน้ำได้ แล้วจึงนำเส้นใยลงย้อม จากนั้นจึงนำเส้นใยไปฟ้งแดด เกิดการออกซิไดส์ กลับไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ

3.4.3 แบบมอร์แดนต์ (Mordant dyeing)

เป็นการย้อมสีโดยใช้สารมอร์แดนต์ เพื่อช่วยในการยึดติดระหว่างสีกับเส้นใย ให้ดีขึ้น ทำให้เกิดความคงทน ไม่ตกสีหรือซีดง่าย สารมอร์แดนต์ที่ใช้ คือ สารละลายของเกลือ โลหะ เช่น สารส้ม (Potassium Aluminium Sulfate, $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$), โครม (Potassium

Dichromate, $K_2Cr_2O_7$), ดีบุก (Stannous Chloride, $SnCl_2$), เหล็ก (Ferrous Sulfate, $FeSO_4$) และ
 จุนสี (Copper Sulfate, $CuSO_4$) เป็นต้น

เมื่อเส้นใยผ่านการย้อมสีและการย้อมด้วยสารละลายมอร์แดนต์แล้ว โลหะของ
 สารละลายมอร์แดนต์จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่แข็งแรง (Strong complex) กับสีและเส้นใย เช่นการ
 ย้อมสี Alizarin กับเส้นใยพวกเซลลูโลส โดยมีโครมเป็นสารละลายมอร์แดนต์ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับสีและเส้นใย
 ที่มา: Vigo (1994)

4. สีย้อม

สีย้อม คือ สารอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อดูดกลืนแสง โดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้า
 ของวัตถุ เพื่อให้วัตถุมีสีขึ้นมา โดยจะมีความทนทานแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของสีย้อมและพันธะ
 ในการยึดติดกับวัตถุนั้น องค์ประกอบของสีย้อม มีดังนี้ (Zollinger, 2003)

4.1 โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

4.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group) มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่
 และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีของสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงกระทบ โครงสร้าง
 โครโมฟอร์จะเกิดการสั่น (Oscillates) เนื่องจากมีการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไป จึงเห็นสี
 ในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน

4.1.2 หมู่ฟังก์ชันนัลของสีย้อม (Dye functional group) องค์ประกอบของโมเลกุล

เป็นส่วนที่ก่อพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใย โครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene ring) ที่มีอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ เช่น หมู่ SO_3^- , Na^+ , COO^- , OH^- และ NH_3^+ เป็นต้น โมเลกุลสีจะยึดติดกับเส้นใย โดยที่หมู่ฟังก์ชันนั้นทำปฏิกิริยากับเส้นใย

4.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

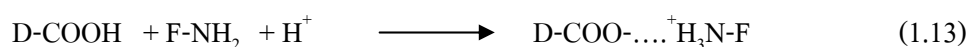
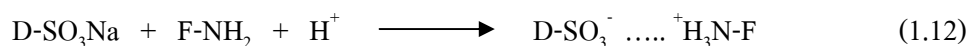
4.2.1 สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuff) เป็นสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ สีย้อมจากพืช เช่น สีน้ำเงินจากต้นคราม สีแดงจากรากต้นเข็ม เป็นต้น และสีย้อมจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงจากครั่ง เป็นต้น

4.2.2 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff)

สามารถจำแนกได้ตามกรรมวิธีการย้อมสีที่นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยไหม ได้แก่ สีแอซิด สีเมทัลคอมเพลกซ์ สีเบสิก สีมอร์แดนต์ สีรีแอคทีฟ สีไดเรกต์และสีธรรมชาติ (Vigo, 1994; Horrock and Anand, 2000; Zollinger, 2003)

1) สีแอซิด (Acid dyes) ประกอบด้วยหมู่กรด (Acidic groups) คือ หมู่ซัลโฟเนต เช่น $-\text{SO}_3\text{Na}$ หรือ $-\text{SO}_3\text{H}$ รวมถึง $-\text{COOH}$ group ซึ่งเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิกจะเกาะติดกับเส้นใยโปรตีนและไนลอนได้ดีด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบเชื่อมประจุ โดยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนโมเลกุลสีกับประจุบวกบนโมเลกุลเส้นใย สีเกือบทั้งหมดเป็นเกลือของกรดอินทรีย์ ความคงทนของสีแต่ละตัวไม่เท่ากัน ถ้ามีปริมาณกรดในน้ำมาก เส้นใยจะมีแคโทดไอออนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยไหมประกอบด้วยหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) เมื่ออยู่ในอ่างย้อมที่มีสภาวะเป็นกรดจะอยู่ในรูป NH_3^+ เป็นส่วนที่เป็น Basic dyesites สามารถจับกับโมกุลของสีที่มีประจุลบได้ (Anion acid dye: D-SO_3^-) ดังนั้นผ้าจึงดูดสีได้มากขึ้นและค่อนข้างรวดเร็ว จึงต้องเติมเกลือแกงลงไป เพื่อให้ผ้าดูดสีช้าลง สีจะติดผ้าสม่ำเสมอมากขึ้น แต่หากใส่มากเกินไปจะทำให้สีหลุดจากเนื้อผ้า เป็นสีย้อมง่าย ราคาถูก ทนต่อแสงแดด และการซักฟอกตั้งแต่ปานกลางถึงดีมาก มีความเป็นเงาสวย สีสดใส และสีดำน สีบางชนิดมีสูตรโครงสร้างคล้ายสีไดเรกต์

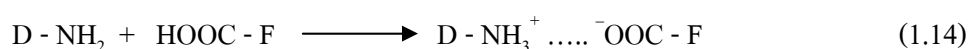
ลักษณะแรงดึงดูดระหว่างกรดอะมิโนที่เป็นเบสในเส้นใย กับหมู่ซัลโฟนิก หรือหมู่คาร์บอกซิลิกของสีย้อม แสดงดังสมการที่ 1.12 และ 1.13



สีแอซิดเป็นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น เส้นใยขนสัตว์ เส้นใยไหม เป็นต้น และเส้นใยสังเคราะห์ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคล้ายเส้นใยโปรตีน เช่น ไนลอน เป็นต้น

2) สีเบสิก (Basic dyes) หรือสีแคทไอออนเป็นไฮโดรคลอไรด์หรือเกลือของสารอินทรีย์ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวและโมเลกุลสีเองมีประจุบวก อาจเรียกสีประเภทนี้ว่าสีแคทไอออน (Cationic dyes) มีสมบัติทนต่อแสงแดดได้ไม่ดี เมื่อตากแดดสีจะซีดเร็ว และทนต่อการซักฟอกได้ไม่ดี สีที่เกาะติดกับเส้นใยอะคริลิก โปรตีน และไนลอนได้ดี แต่ไม่มีพลังเกาะติดเส้นใยเซลลูโลส การเกาะติดอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของสีย้อมและประจุลบบนเส้นใย

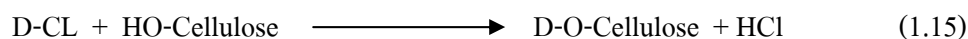
ลักษณะแรงดึงดูดของสีย้อมเบสิกและเส้นใย แสดงดังสมการที่ 1.14



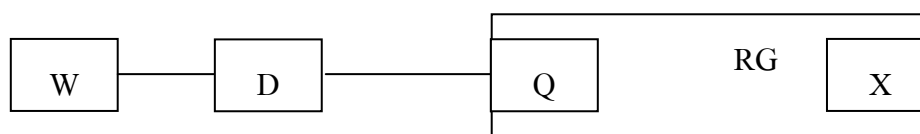
3) สีไคเร็กต์ (Direct dyes) หรือสีย้อมตรง ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพวกเอโซ (Azo) ซึ่งเป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิก (Sulphonic acid) เป็นสีที่ละลายได้ในน้ำเย็นธรรมดา และซึมเข้าเส้นใยโดยไม่ทำปฏิกิริยา ทำให้สีไคเร็กต์หลุดได้ง่าย จึงเป็นสีที่ไม่คงทนต่อการซัก โมเลกุลของสีจะแตกตัวโดยตัวเองจะมีประจุลบ การย้อมติดเกิดได้ดีเมื่อน้ำย้อมมีเกลือโครโมเจน เช่น เกลือต่างๆ เป็นสีที่มีราคาถูก ความสดใสไม่ค่อยดี ย้อมง่าย แต่มีความคงทนค่อนข้างต่ำ การเกาะติดบนโมเลกุลอาศัยแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์เป็นสำคัญ นอกจากนี้เป็นสีที่สลายตัวง่าย โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงในสภาวะด่าง และสีไคเร็กต์มักจับตัวแล้วตกตะกอนเนื่องจากโครงสร้างของสีซึ่งมีลักษณะแบนราบและยาว (กาวิ, 2002)

4) สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีสังเคราะห์ที่สามารถละลายน้ำได้ดี โมเลกุลของสีประกอบด้วยกลุ่มเคมีที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) โครโมฟอร์ หมู่เชื่อมต่อและหมู่ทำปฏิกิริยา สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมโมเลกุลคาร์บอนกับอะตอมออกซิเจน ไนโตรเจน ของกลุ่มไฮดรอกซิล และอะมิโนของเส้นใยตามลำดับ พันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับหมู่อะมิโนจะพบในกลุ่มโพลีเอไมด์ และพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับทุกกลุ่ม จะพบในเส้นใย

โปรตีน เป็นสียที่ข้อม่ง่ายให้แสงสว่างสดใสมาก เมื่อเทียบกับสียไคเร็กซ์ หรือสียแวนต์ และมีความคงทนต่อการซักสูง การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสียข้อม่งกับเส้นใย แสดงดังสมการ 1.15



ลักษณะโครงสร้างของสียรีแอคทีฟ ประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน ดังนี้



เมื่อ W คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubilizing Group)

โดยทั่วไปเป็นพวงซัลโฟนิค ซึ่งอยู่ติดกับหมู่โครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกกลุ่มโครโมฟอร์

Q คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับกลุ่ม

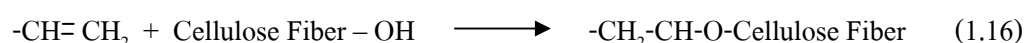
โครโมฟอร์ (Bridging group) เช่น $-\text{NH}-$, $-\text{NHCO}-$, $-\text{SO}_2-$, NHSO_2- และ $-\text{NHCH}_3-$ เป็นต้น

RG คือ กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive group) ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำให้สียทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

X คือ Nucleofugic Leaving Group

ที่มา: Zollinger (2003)

กลุ่มรีแอคทีฟบางครั้งอาจจะติดกับหมู่โครโมฟอร์ โดยไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่เป็นสารเฮเทอโรไซคลิกริง (Heterocyclic ring) ซึ่งจากโครงสร้างพื้นฐานมี 2 ส่วนที่สำคัญ คือ กลุ่มโครโมฟอร์ และกลุ่มรีแอคทีฟ เป็นส่วนที่ทำให้สียแต่ละชนิดแตกต่างกัน



5) สีมอร์แดนต์หรือโครม (Mordant or Chrome dyes) ประกอบด้วยสียที่ได้จากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้นเอง ตัวสียไม่มีพลังในการเกาะเส้นใยแต่ติดได้เมื่อเส้นใยทำมอร์แดนต์ด้วยออกไซด์ของโลหะก่อน ความคงทนต่อการซักดีมาก และคงทนต่อแสงดี

6) สีมัถคอมเพลกซ์ (Metal Complex Dyes) เป็นสีประกอบเชิงซ้อน โมเลกุลมีอะตอมของโลหะหนัก อาจจัดอยู่ในสีแอซิด เพราะมีกรรมวิธีในการย้อมคล้ายกัน โดยย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกรดและใช้สำหรับเส้นใยโปรตีนและไนลอนเช่นเดียวกัน ความคงทนต่อการซักดีกว่าสีแอซิดทั่วไป แต่ความสดใสของสีไม่ดีเท่าสีแอซิด

ตารางที่ 4 ประเภทของสีย้อมจำแนกตามกรรมวิธีการย้อม

Dye class	Characteristics	Typical associated fiber	Dye-fiber Attachment mechanism	Typical method of application
Acid	Anionic Highly water soluble poor wet fastness	Nylon, Wool	Ionic bond	Fiber placed in acidified aqueous media pH 3-5 Fiber assumes a positive charge dye added and temperature to 50-110°C
Metal complex acid dye (dye molecule is complexes with chromium, cobalt)	Anionic low water solubility good wet fastness	Nylon, Wool	Ionic bond	As with acid dye pH 5-7
Direct	Anionic Highly water soluble poor wet fastness	Cotton, Viscose	Ionic bond	Fiber placed with dyebath slightly alkaline Add dye electrolyte (NaCl, Na ₂ SO ₄) to displace dye to fiber, temperature to 98°C
Basic or cationic	Cationic Highly water soluble	Acrylics	Ionic bond	Fiber placed in acidified aqueous dyebath at pH 3-5 dye add temperature increased from 100-105°C, dye diffused into fiber
Dispersed	Colloidal dispersion Very low water solubility Good wet fastness	Polyester, nylon, acrylic,	Colloidal impregnation, adsorption	Fiber placed in acidified aqueous dyebath at pH3-5 dye add temperature to

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Dye Class	Characteristics	Typical associated fiber	Dye-fiber Attachment mechanism	Typical method of application
Dispersed		cellulose-acetate		130°C cave dye migration into fiber
Reactive	Anionic Highly water soluble Good wet fastness	Cotton, viscose, wool	Covalent bonds	Fiber placed in aqueous dye solution add salt to displace dye to fiber add alkaline to cause reaction between dye and fiber
Sulphur	Colloidal after reaction in fiber Insoluble Wet fast	Cotton, viscose	Dye precipitated In-situ in fiber	Fiber placed in dyebath dye dissolved in alkaline sodium sulphur Add dye electrolyte (NaCl, Na ₂ SO ₄) to displace dye to fiber to fiber, temperature to 98°C
Mordant or chrome	Anionic Water soluble Good wet fastness	Wool	Fiber-chrome Dye complex	Fiber placed in acidified dyebath add sodium dichromate add dye temperature at 98°C

ที่มา: Shore (1990)

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของสีย้อม และการนำไปประยุกต์ใช้สีย้อมสี

Dyestuff class	Applications/ use	Properties	Chemicals and auxiliaries need
Acid dyes	Mainly used for polyamide (70-75%) and wool (25-30%) dyeing Also used for silk and some modified acrylic fibers	Bright colors Poor to excellent fastness to light and washing	For dyeing: Sodium sulphate (for level-dyeing and fast acid dyes), sodium acetate and ammonium sulphate (for acid milling dyes) pH regulators: acetic, formic and sulphuric acid Levelling agents: mainly cationic compounds such as ethoxylated fatty amines
Basic Dyes (cationic)	Formerly used to dye silk and wool (using mordant); Nowadays almost exclusively used on polyacrylic fibers	Excellent fastness performance on polyacrylnitrite fibers Poor fastness on silk and wool	For dyeing: Weak acid conditions, as solubility is greater in organic solvents like acetic acid, ethanol, and ether Specific leveling agents (so-called retarders): quaternary ammonium compounds with long alkyl side-chains (most important group), but also electrolytes and anionic condensation products between formaldehyde and naphthalenesulphonic acid

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Dyestuff class	Applications/ use	Properties	Chemicals and auxiliaries need
Direct (substantive) dyes	Used for dyeing cotton, rayon, linen, jute, silk and polyamides fibers; Occasionally used in direct printing processes	Bright and deep colors Light-fastness greatly varies depending on the dyestuff Wash-fastness is limited unless the textile is after-treated	For dyeing: Electrolytes, usually sodium chloride or sodium sulphate Wetting and dispersing agents: mixtures of non-ionic and anionic surfactants After-treatment agents: usually quaternary ammonium compounds with long hydrocarbon chains (so-called fixative cationic agents), or also formaldehyde condensation products with amines, polynuclear aromatic phenols, cyanamide or dicryanamide
Disperse dyes	Widely used for dyeing: Mainly used for polyester; Also for cellulose (acetate and triacetate), polyamide, acrylic fibers; Also widely used for printing	Quite good fastness to light Fastness to washing depends on the fibers (e.g. therefore polyamides and acrylic are dyes nearly exclusively in pastel	For dyeing: Dispersants (all disperse dyes already have a high content of dispersants in their formulation) Carriers for polyester dyeing (especially polyester/wool blends) as dyeing is performed at

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Dyestuff class	Applications/ use	Properties	Chemicals and auxiliaries need
Disperse dyes	synthetic fibers	shade)	temperature below 100°C Thickeners (in padding processes): polyacrilates or alginates Reducing agents: mainly sodium hydrosulphite, added in solution with alkali in the final washing step
Metal-complex (solvent) dyes (also called premetallised dyes)	Have great affinity for protein fibers (wool,silk); 1:2 metal-complex dyes are also suitable for polyamide fibers (30%)	Excellent light-fastness Washing fastness is not as good as with chrome dyes (in darker shades particularly)	pH regulators: sulphuric, formic and acetic acid Electrolytes: sodium sulphate, ammonium acetate and sulphate Levelling agents: mixtures anionic and non-anionic surfactants
Mordant (chrome) dyes	Generally used for protein (wool and silk) dyeing; Practically no longer used for polyamide fibers or for printing	Good levelling properties Very good wet fastness Primarily used to obtain dark shades (greens, blues and blacks) at moderate cost	Potassium dichromate or chromate salt (as chrome donors) Other organic acids such as tartaric or lactic acid (enhance conversion of Cr VI to Cr III) Sodium or ammonium phosphate

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Dyestuff class	Applications/ use	Properties	Chemicals and auxiliaries need
Reactive dyes	Dyeing and printing: Mainly used for dyeing cellulose fibers such as cotton and rayon; Sometimes used for wool, silk and polyamide	High wet fastness (better than the less expensive direct dyes) Level dyeing is difficult to obtain Chlorine fastness and light fastness (under severe conditions) are slightly poorer than that of vat dyes The wide range of dyeing techniques	For dyeing cellulose fibers: Alkali (sodium carbonate, bicarbonate and caustic soda) Salt (mainly sodium chloride or sulphate) Urea (for continuous processes in one-bath method) For dyeing wool or polyamide fibers: Levelling agents: special amphoteric agents Ammonium sulphate, in solution at pH4.5 to 7
Sulphur (leuco sulphur or solubilised sulphur) dyes	Mainly used for cotton and viscose substates; May also be used for dyeing blends of cellulose and synthetic fibers (including polyamides and polyesters);	Very good bleach and wash fastness Moderate to good light fastness Poor resistnce to light and laundering of lighter shades (i.e. mostly used for dark shades)	Dispersins agents as dispersible pigments are used for pad-dyeing: usually naphtalenesulphonic acid-formaldehyde condensates, ligninsulphonates and sulphonates oils Reducing agents: mainly siduim sulphide and sodium hydrigensulphyde; alternatively binary

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Dyestuff class	Applications/ use	Properties	Chemicals and auxiliaries need
Sulphur (leuco sulphur or solubilised sulphur) dyes	Occasionally used for dyeing silk; Not used in textile printing (apart from black shades)		system made of glucose and sodium dithionite (hydrosulphite) or thiourea dioxide are used Oxidising agents: hydrogen peroxide or halogen-containing compounds such as bromate, iodate and chlorite Alkali (mainly caustic soda) Salt (sodium chloride and sulphate) Complexing agents (sometimes): EDTA and polyphosphates

ที่มา: Lacasse and Baumann (2004)

5. สารช่วยติดสี

สีแอซิด สีเบสิก และสีไดเร็กต์ เป็นสีสังเคราะห์ที่มีลักษณะการเกาะติดเส้นใย โดยอาศัยแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน ซึ่งกำลังของแรงดึงดูดทางกายภาพนี้จะไม่สูงมากนัก จึงมีความคงทนต่อการซักไม่ค่อยดี และสามารถถูกทำลายได้ง่าย (Vigo, 1994; Horrock and Anand, 2000) จึงทำให้ปัญหาของผ้าไหมข้อหนึ่งคือ สีตกและทำให้ผ้าไหมมีสีซีดจาง ดังนั้นแนวทางการแก้ปัญหา คือ

1. ใช้สารช่วยติดสี เพื่อเป็นตัวกลางสร้างพันธะทางเคมี ระหว่างโมเลกุลของสีเชื่อมกับโมเลกุลของเส้นใย
2. ควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการย้อมให้เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เวลาในการย้อมสี เป็นต้น

สารช่วยติดสีจะมีผลต่อผ้าที่ย้อมด้วยสีธรรมชาติ ช่วยให้การย้อมติดระหว่างตัวสีกับเส้นใยดีขึ้น เพื่อความคงทนของสีย้อมต้องใช้สารช่วยติดสีในกระบวนการย้อม เมื่อสารช่วยติดสีซึมเข้าสู่ภายในเส้นใยแล้วจะจับตัวกับโมเลกุลของสีย้อม ทำให้สีย้อมมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนสีย้อมเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะทำให้สีไม่ตกและไม่ซีดจางง่าย สารช่วยติดสีส่วนใหญ่เป็นสารที่พบได้ทั่วไปในครัวเรือนและมีราคาไม่แพง เก็บไว้ได้นานและไม่เป็นอันตราย เช่น สารส้ม (Potassium aluminium sulfate: $KAl(SO_4)_2$) ชาวอียิปต์โบราณใช้ในการย้อมผ้าเพื่อให้สีติดทน เกลือแกง (NaCl) และกรดน้ำส้ม (Acetic acid: CH_3COOH) ใบไม้หรือผลของพืชที่มีรสเปรี้ยว ซึ่งชาวบ้านเรียกว่า “ส้ม” มาผสมสีหรือย้อมทับ ทำให้สีติดแน่นขึ้น โดยใช้น้ำมะนาว น้ำมะกรูด น้ำมะขามเปียก หรือน้ำส้มที่ได้จากการต้มใบมะขาม ใบเหมือด ใบโมง และส้มป่อย

การนำสารช่วยติดสีมาใช้ในการย้อมด้วยสีธรรมชาติ จะช่วยให้สีย้อมมีความคงทนมากขึ้น ได้แก่ เกลือของโลหะบางชนิด เช่น อะลูมิเนียม โครเมียม โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง เป็นต้น และกรดบางชนิด คือ กรดอะซิดิก (กรดน้ำส้ม) กรดทาร์ทาริก เป็นต้น เมื่อนำผ้าไปต้มหรือแช่กับสารช่วยติด เกลือของโลหะจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ไม่ละลายน้ำแทรกตัวอยู่ในเส้นใยและจับกับโมเลกุลของสี ทำให้สีไม่ละลายออกมาเมื่อนำไปซักล้าง

อจธราพร (2527) กล่าวว่า สิริแอคทีฟ เป็นสีที่สามารถซึมกระจายเข้าสู่เส้นใยได้เร็ว โดยทั่วไปนิยมเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อปรับสภาพน้ำย้อมให้เป็นด่าง และเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการย้อมสิริแอคทีฟอีกด้วย

กลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ (เคมีสิ่งทอ) (2544) ได้รายงานว่าการย้อมสีแอซิด หากยังมีสีเหลือในน้ำย้อม ให้เติมกรดอะซิติก หรือกรดฟอร์มิก ประมาณร้อยละ 1-2 จะทำให้สีที่เหลืออยู่สามารถดูดติดได้เพิ่มขึ้น

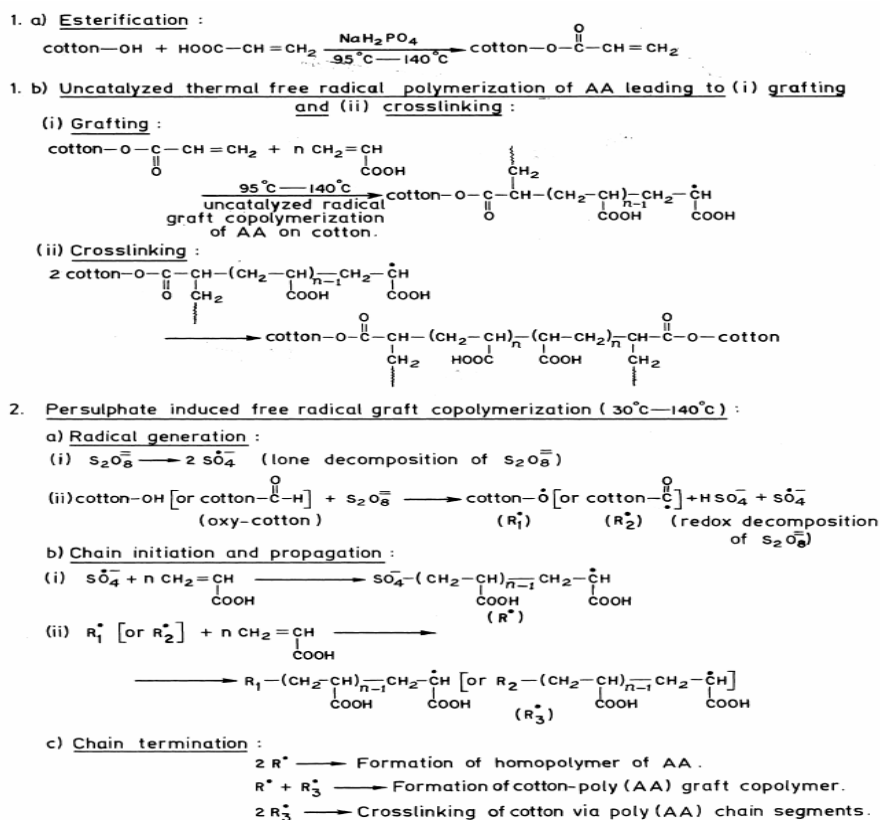
สำหรับการนำสารช่วยติดสีมาใช้ในการย้อมผ้า สามารถใช้ได้ทั้งก่อน ระหว่าง และหลังการย้อม ซึ่งนฤมล (2533) ทำการทดลองย้อมไหมด้วยครั้งและแก่นแกลด โดยการเติมสารช่วยติดสีก่อนย้อม ขณะย้อม และหลังย้อม ผลการทดลองสรุปว่าการเติมสารช่วยติดสีก่อนและหลังการย้อม สีจะเกาะติดเส้นใยเพียงเล็กน้อยและได้สีที่ใกล้เคียงกัน แต่การเติมสารช่วยติดสีระหว่างการย้อมจะได้สีที่สม่ำเสมอ และเกาะติดเส้นไหมได้ดีกว่า 2 วิธีแรก

Glosh and Das (2000) ได้ทำการศึกษาการปรับแต่งผ้าฝ้ายโดยกรดอะคริลิก (Acrylic Acid: AA) โดยมีสาร NaH_2PO_4 และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะความร้อน โดยได้กล่าวว่า ในกระบวนการตกแต่งผ้าฝ้ายมีการใช้เรซินจากอนุพันธ์ของ Methylolated-urea คือ Dimethylol Dihydroxyethylene Urea (DMDHEU) ซึ่งมีส่วนประกอบของ Formaldehyde ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้กรดพอลิคาร์บอกซิลิกในการสร้างพันธะข้าม ซึ่งทางผู้ศึกษากล่าวว่าสาร Non-Polymeric (Polycarboxylic Acid) ไม่สามารถปรับปรุงความคงทนต่อการซักล้าง ความคงทนต่อการขัดถู หรือความแข็งแรงต่างๆ และการเพิ่มของความชื้นในเส้นใยฝ้าย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของผ้าฝ้าย คือ 1) ปฏิกิริยา Esterification 2) ปฏิกิริยา Polymerization และ 3) การประยุกต์ใช้สารสร้างพันธะข้าม เช่น กรดอะคริลิก ภายใต้อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาดังนี้

การเตรียมผ้าฝ้าย โดยนำผ้าฝ้ายที่ฟอกขาวแล้วขนาด 250-300 กรัม ใส่ลงในซามเหล็กที่มีสารละลาย 0.25M HCl ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนผ้า:ของเหลว 1:20 (w/v) จากนั้นจึงนำผ้าฝ้ายที่ได้แช่ในสารละลายที่มี Potassium peroxodisulphate ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) และ กรดอะคริลิก ซึ่งเป็นการเตรียมผ้าฝ้ายจากนั้นจึงนำผ้าฝ้ายไปแช่ในสารละลาย NaH_2PO_4 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Esterification ที่อุณหภูมิ 30°C ที่เวลาต่างกัน จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 140°C 5 นาที ทำการซักผ้าฝ้ายตามวิธีมาตรฐานของ ISO II ด้วยน้ำ แล้วจึงทำให้แห้ง จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ค่า

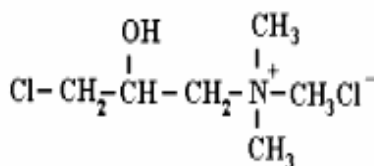
Weight Gain, ปริมาณ Carboxyl และ ปริมาณเอสเทอร์ และคุณสมบัติที่เกี่ยวกับเส้นใย จากนั้นนำ ผ้าฝ้ายไปย้อมสี โดยใช้สี Bismark Brown (CI Basic Brown 331) ที่ 4% o.w.f ในอ่างย้อมที่ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง pH 4.0 หลังจากย้อมสีแล้ว ล้างผ้าฝ้ายที่ได้ด้วยน้ำกลั่นและ ปล่อยให้แห้ง จากนั้นประเมินผลของกรดอะคริลิกต่อการติดสีเบสิกของผ้าฝ้ายโดยค่า K/S เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ และ S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง (Scattering coefficient)

ผลการศึกษา ของค่า pH จากกรดอะคริลิก ในการตกแต่งสำเร็จต่อสมบัติของผ้าฝ้าย พบว่า ที่ pH 7.0 เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการกราฟต์ (Grafting) และการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยพบว่าช่วยเพิ่มน้ำหนักผ้าประมาณร้อยละ 80 ส่วนที่สภาวะต่าง (pH 8 และ 10) ช่วยในการเพิ่ม น้ำหนักแต่ไม่ช่วยในการเกิดเอสเทอร์ โดยหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะคริลิก จะช่วยปรับแต่งเส้นใย ฝ้าย และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ตัวช่วยเพิ่มค่าการติดสี (K/S value) ของสีเบสิกด้วย นอกจากนี้ ปริมาณความชื้นของเส้นใยเพิ่มจากร้อยละ 6.31 เป็นร้อยละ 9.5 ที่สภาวะ pH 7.0 อุณหภูมิ 30°C โดยกลไกการปรับแต่งผ้าฝ้ายด้วยกรดอะคริลิก นั้นมี NaH_2PO_4 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งจะเปลี่ยนหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่เอสเทอร์ ส่วน $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ช่วยทำให้เกิด Free radical ในการ เกิดปฏิกิริยา Polymerization และการกราฟต์เส้นใย ในปฏิกิริยา Copolymerization ด้วยกรด อะคริลิกภายใต้สภาวะความร้อน การปรับแต่งเส้นใยเซลลูโลส โดยมี NaH_2PO_4 และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การปรับแต่งเส้นใยเซลลูโลส โดยมี NaH_2PO_4 และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ที่มา: Glosch and Das (2000)

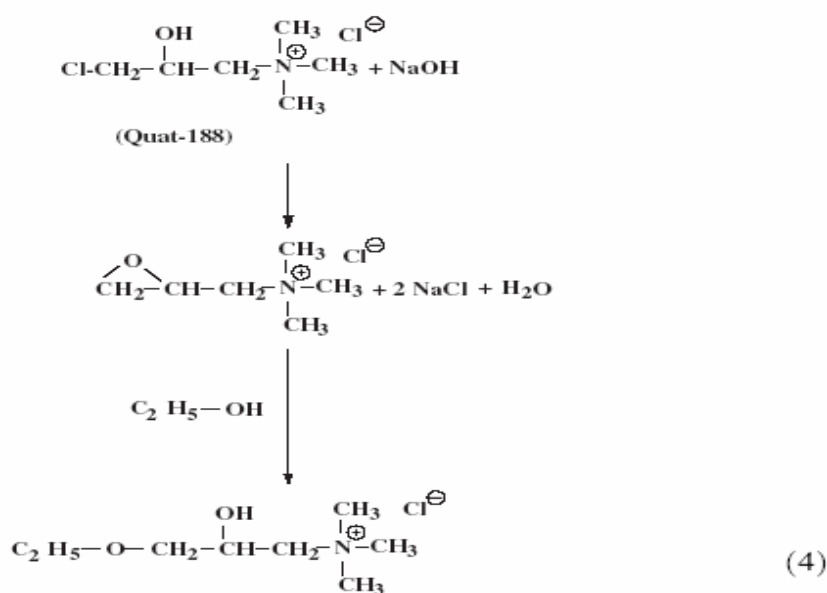
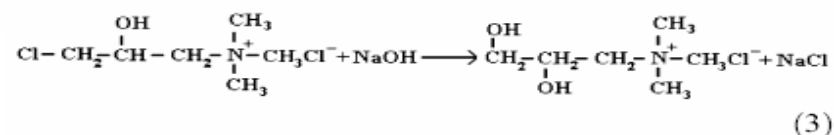
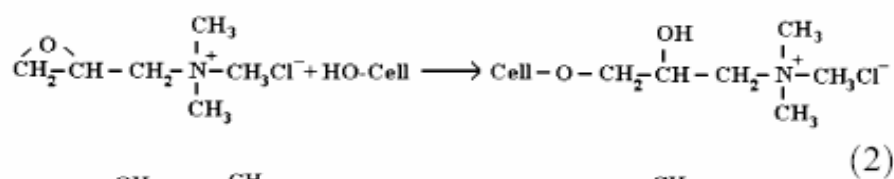
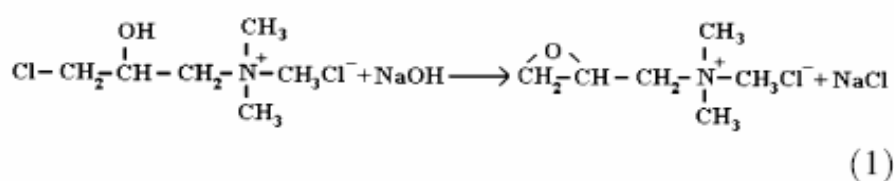
Hashem *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาการปรับแต่งเส้นใยฝ้าย โดยใช้ Non-Formaldehyde ซึ่งสามารถตกแต่งเส้นใยได้ง่ายและปลอดภัยกว่าการใช้สารที่มี Formaldehyde เป็นองค์ประกอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาของเส้นใยฝ้ายซึ่งมีประจุลบกับสารสร้างพันธะข้ามซึ่งมีประจุบวก โดยเชื่อมกันด้วยพันธะไอออนิกที่สภาวะความเป็นด่าง ในการศึกษาที่ใช้สาร 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride (Quat-188) (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 สารสร้างพันธะข้าม 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride
(Quat-188)

ที่มา: Glosch and Das (2000)

โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของ Quat-188 อัตราส่วนผ้า:ของเหลว และวิธีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา Cationization ที่ส่งผลต่อหมู่ Carboxyl ของเส้นใยฝ้าย Partially Carboxymethylated Cotton Fabric (PCMC) การสร้างพันธะข้าม แสดงผลเป็นค่า %N สำหรับขั้นตอนการวิจัยใช้เส้นใยผ้าฝ้าย 100% ที่ฟอกขาวแล้ว นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C 5 นาที และแช่ในเกลือโซเดียมของ Monochloroacetic acid (0-3 mol) 5 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Carboxymethylation แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังภาพที่ 7

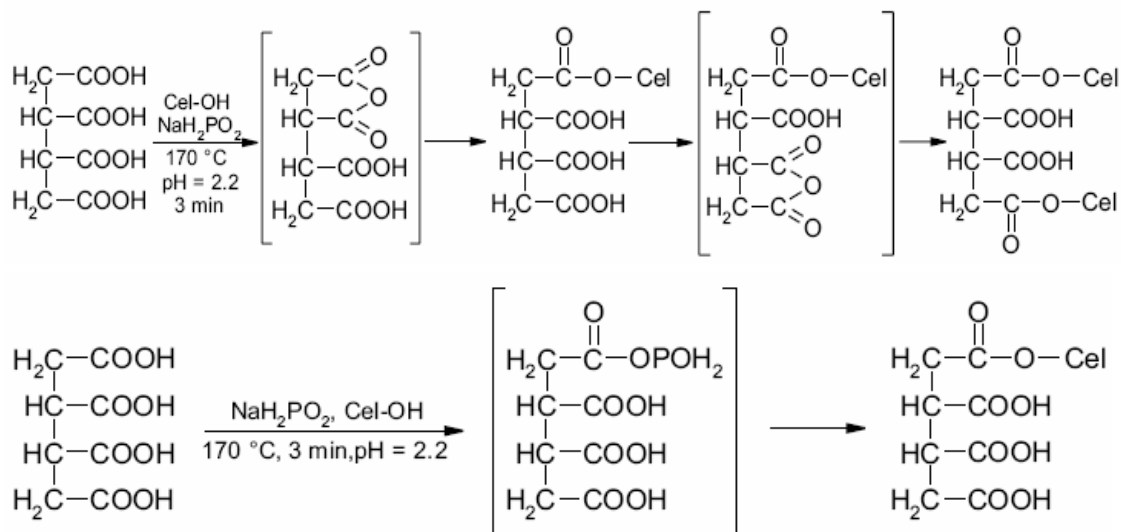


ภาพที่ 7 ขั้นตอนเกิดปฏิกิริยา Carboxymethylation

ที่มา: Hashem *et al.* (2004)

Lickfield *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาสารสร้างพันธะต่อความแข็งแรงเชิงกล และความต้านทานต่อการขาดของเส้นใยฝ้าย ซึ่งพบว่าการตกแต่งสำเร็จเส้นใยฝ้าย มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเส้นใย ทั้งความคงทนต่อการยืดหยุ่นและความคงทนต่อการขาด โดยเกิดจากปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่าความเป็นกรด ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา Polymerization และการสร้างพันธะของโมเลกุลเซลลูโลส ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทดลองโดยนำผ้าฝ้ายแช่ในอ่างซึ่งมี BTCA (1,2,3,4-Butanetetracarboxylic acid) และโซเดียมไฮโปฟอสเฟต (Catalyst) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นแช่ในสารละลาย 0.1M NaOH ที่อุณหภูมิ 50°C 48 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบความคงทนต่อการยืดหยุ่น ค่า Wrinkle Recovery Angle (WRA) และการวัดสารสร้างพันธะข้ามโดยเครื่อง FT-IR Spectrometer ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นและค่า pH ของ BTCA มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยปริมาณของหมู่เอสเทอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้น BTCA และ pH มีค่าลดลง โดยผลการศึกษาพบว่าช่วงค่า pH ที่เหมาะสมคือ 2.2-2.8 และลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นถึง 4.0 ต่อมาได้ทำการศึกษาค่ามุมการคืนตัวต่อการยับ (WRA) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้น BTCA และอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 180°C ปริมาณเอสเทอร์และค่า WRA ที่ pH 2.8 มีปริมาณสูงกว่าที่ pH 2.2 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้รายงานไว้ว่า อาจเนื่องจากสภาวะความเป็นกรดมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา Polymerization ของผ้าฝ้ายกับ BTCA

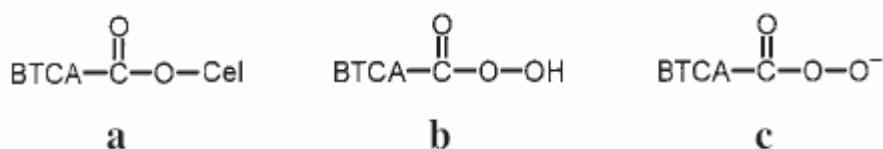
Sauperl *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์วิธี Spectrophotometry เพื่อประเมินอิทธิพลของสภาวะต่างต่อการสร้างพันธะข้ามของ BTCA ต่อผ้าฝ้าย กรด BTCA เป็นกรดพอลิคาร์บอกซิลิกนำมาใช้แทนการใช้สารที่มีฟอร์มัลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษเป็นสารก่อมะเร็ง ในรายงานนี้กล่าวว่าประสิทธิภาพของสารสร้างพันธะขึ้นกับ ปริมาณสารสร้างพันธะข้าม ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ เวลา และค่า pH ปฏิกิริยาของกรดพอลิคาร์บอกซิลิกกับเส้นใยเซลลูโลส แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่หนึ่งเป็นการเกิดไซคลิกแอนไฮไดรด์ ด้วยพันธะเอสเทอร์ โดยมีสารโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 การเกิดปฏิกิริยา ไซคลิกแอนไฮไดรด์ ในการสร้างพันธะระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสกับ BTCA

ที่มา: Sauperl *et al.* (2003)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยนำผ้าฝ้าย 100% ที่ความเข้มข้นของ BTCA และ $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นต่างกัน ในการย้อมสีโดยใช้สี Methylene blue สัดส่วนผ้าต่อสารละลาย 1:20 เดิมสี 5%, Na_2CO_3 5% และ NaCl 10% โดยสี Methylene blue จะจับกับหมู่คาร์บอกซิลของเส้นใย ซึ่งเป็นการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เนื่องจากในสภาวะต่างหมู่คาร์บอกซิลของ BTCA เปลี่ยนไปอยู่ในรูปคาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ซึ่งจะจับกับสีและหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ของเส้นใยเซลลูโลสได้ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อผ้าฝ้ายเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับ BTCA และ $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Catalyst) หมู่ Carbonyl ของผ้าฝ้ายจะอยู่ในรูป Ester, Carboxyl และ Carboxylate แสดงดังภาพที่ 9



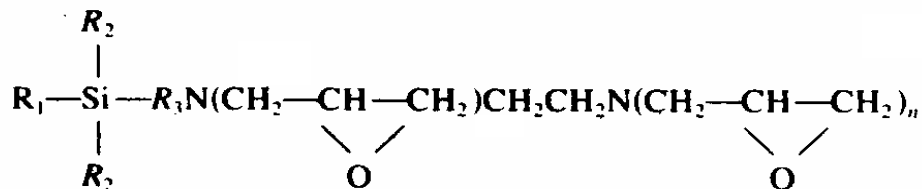
ภาพที่ 9 หมู่ Carbonyl ของเส้นใยฝ้ายที่อยู่ในรูป a) Ester b) Carboxyl c) Carboxylate

ที่มา: Sauperl *et al.* (2003)

โดยพบว่าหมู่เอสเทอร์ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1725 cm^{-1} (เป็นการยืนยันว่าเป็นพันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อมระหว่างเซลลูโลส และ BTCA) ส่วนหมู่ Carboxylate จะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 1576 cm^{-1} จากความต่างในการดูดกลืนคลื่นแสงจึงสามารถวัด โดยเครื่อง FT-IR Spectrum ได้ โดยทำการวัดก่อนและหลังจากแช่ในสารละลาย 0.1 M NaOH ซึ่งจากการทดสอบหา % ของสารสร้างพันธะ พบว่าปริมาณหมู่เอสเทอร์ (ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1725 cm^{-1}) ต่อปริมาณหมู่ Carboxylate (ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1576 cm^{-1}) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ BTCA เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าปริมาณ BTCA ในช่วง 0 ถึง 1% หมู่คาร์บอกซิลของผ้าฝ้ายไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่สุดในช่วง 1 ถึง 3% ของสารสร้างพันธะข้าม BTCA ที่เติมลงในอ่างตกแต่งสำเร็จ

Cai *et al.* (2001) ทำการศึกษาเรื่องการตกแต่งสำเร็จเส้นใยไหมด้วย สาร EPSIA (a silicone-containing epoxy crosslinking agent) และมีการเติมสาร Dispersion agent JFC 5 g/l และตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหม โดยพบว่าสถานะที่เหมาะสมต่อการตกแต่งสำเร็จ คือ ความเข้มข้นของสาร EPSIA 6% ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 g/l หลังจากนั้นทำให้แห้งที่ 60°C เป็นเวลา 3.5 นาที การอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 7 นาที ทั้งนี้พบว่าเส้นใยไหมมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้นดังนี้ ค่าความสามารถในการคืนตัวต่อการยับแบบ Dry Crease Recovery Angle (CRA) มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 และค่า Wet CRA มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 51 ค่าความยืดหยุ่นของผ้าเปียก (Wet resilience) และผ้าแห้ง (Dry resilience) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยผ้าเปียกมีค่าความยืดหยุ่นสูงกว่าผ้าแห้ง ค่าการหดตัวของเส้นใย (Shrinkage) มีค่าลดลง และค่า Breaking strength มีค่าลดลงเล็กน้อย โดยลดลงน้อยกว่าร้อยละ 3 ค่าความคงทนต่อแรงฉีกขาด มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 96 (แบบ Filling direction) และร้อยละ 80 ของ Warp direction นอกจากนี้ค่า Bending stiffness มีค่าลดลงร้อยละ 20 และค่าความคงทนต่อการขัดถู มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 200 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้สาร EPSIA ช่วยลดแรงระหว่างเส้นใย และช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของเส้นใยไหม แต่ลดความชื้นของเส้นใยไหม ร้อยละ 12.60 จากนั้นนำผ้าไปทดสอบความคงทนต่อการซักรีด โดยในรอบที่ 20 ของการทดลอง พบว่าค่า Dry CRA และ Wet CRA มีค่า ลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 6 ตามลำดับ และเมื่อนำผ้าไหมย้อมด้วยสีย้อม CI Acid Orange 7 ค่าการดูดซับสี ของผ้าไหมมีค่าลดลงจากผ้าที่ไม่ได้มีการตกแต่งสำเร็จด้วย EPSIA ทั้งนี้อาจเนื่องจากโมเลกุลของสีสามารถเข้าจับกับผ้าไหมได้ลดลง เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะข้ามระหว่างสาร EPSIA และเส้นใยของผ้าไหมนั่นเอง เมื่อนำมาทดสอบค่าความคงทนของสีต่อการซัก ต่อเหงื่อ และต่อการขัดถู พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากผ้าไหมไม่มีการตกแต่งสำเร็จ

Cia and Qiu (2003) ทำการศึกษาการตกแต่งสำเร็จผ้าไหมด้วยสารละลาย Epoxy Silicone Crosslinking Agent A (EPSIA) ดังภาพที่ 10 ซึ่งเป็นสารที่สามารถสร้างพันธะข้ามได้ มีสมบัติละลายน้ำ และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งนำมาใช้ตกแต่งสำเร็จผ้าไหม ด้วยวิธี two-dipped two nipped โดยเติมสาร EPSIA 60 g/l, Invadine JFC 5g/l และ Potassium thiocyanate $100 \pm 5\%$ ปริมาณ 3 g/l หลังจากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึง อบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปทดสอบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยไหม โดยพบว่า การทดสอบ Wet และ Dry resilience มีค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือ ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น และมีค่า Whiteness ลดลงจากผ้าที่ไม่ได้มีการตกแต่งสำเร็จ สำหรับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) มีค่าลดลงเล็กน้อย โดยเส้นพุ่งและเส้นยืนมีค่าเป็นร้อยละ 93.7 และ 95.1 ของเส้นใยที่ไม่มีการตกแต่งสำเร็จ ส่วนการทดสอบค่า Moisture regain มีค่าลดลงร้อยละ 4.8 เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่มีการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ สำหรับการทดสอบค่า Water retention มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการตกแต่งสำเร็จผ้าไหม ด้วย EPSIA ช่วยเพิ่มความสามารถในการคืนตัวต่อการยับ ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำของ ผ้าไหมยังไม่ทราบผลแน่ชัด



ภาพที่ 10 สารสร้างพันธะข้าม Epoxide EPSIA (Epoxy Silicone Crosslinking Agent A)

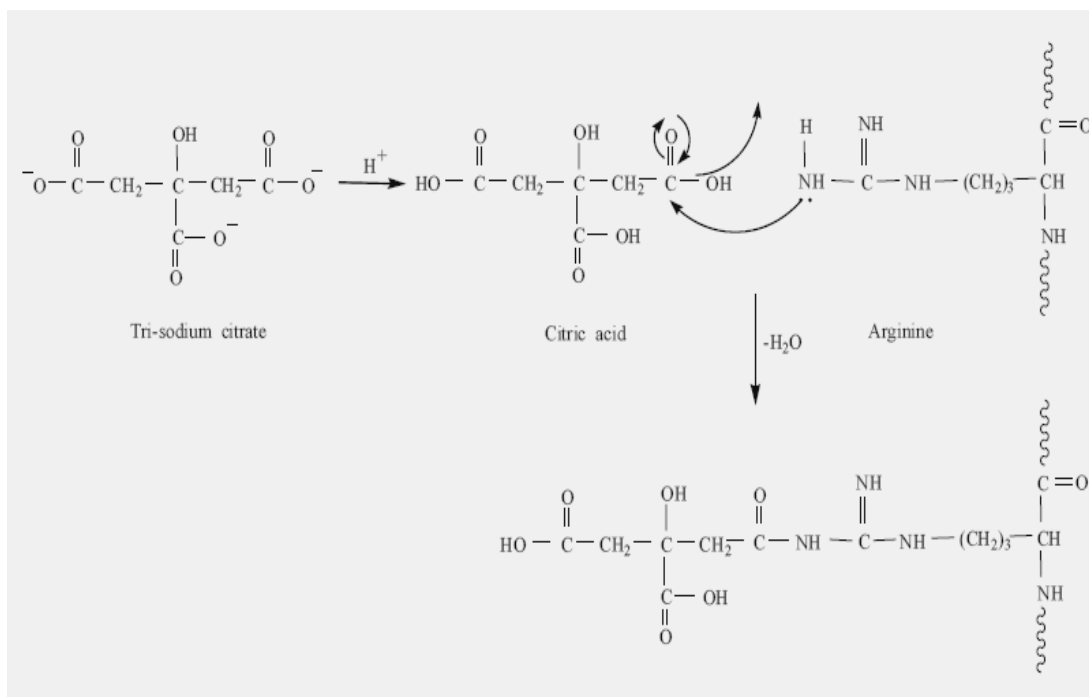
ที่มา: Cia and Qiu (2003)

จากนั้นนำไปทดสอบความคงทนของผ้าไหมต่อการซัก พบว่า ค่าการละลายในสารละลาย ผสม มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงรอบการซักที่ 10 จะเริ่มคงที่ ทั้งนี้กลไกที่ลดความสามารถการละลายน้ำของ ผ้าไหมที่ตกแต่งสำเร็จด้วย EPSIA ไม่ทราบแน่ชัด แต่อาจเนื่องจากการเกิดการสร้างพันธะข้าม ระหว่าง Active group ของสายพอลิเอปไทด์ของเส้นใยไหม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง phenol hydroxyl ของกรดอะมิโนไทโรซีน และสาร EPSIA จึงส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมนั่นเอง และเมื่อทำการย้อมสีด้วยสีย้อม Polar Red 10 B ที่ pH 5.0 พบว่าผ้าไหมที่ตกแต่งสำเร็จมีการดูดซับสี (Dye uptake) ได้สูงกว่าผ้าไหมที่ไม่มีการตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เนื่องจากผ้าไหมที่มีการตกแต่งสำเร็จด้วย EPSIA ส่งผลให้พื้นผิวผ้าไหมเป็นประจุบวก ทำให้เกิดแรงดึงดูดอย่างแข็งแรงต่อ

สีที่มีประจุ (Ionic dyes) และช่วยเพิ่ม Dyeing sites ของผ้าไหมอีกด้วย นอกจากนี้การย้อมสีไหมด้วยสี Lanaset Yellow 2R และ Lanaset Grey G พบว่ามีค่าการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก พบว่ามีค่าการเปื้อนสีบนผ้าฝ้ายและผ้าไหม มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับสี Lanaset Red G ค่าความคงทนของสีต่อการซักมีค่าเพิ่มขึ้น 1 ระดับ และการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถูทั้งที่สภาวะ Dry และ Wet พบว่าช่วยเพิ่มค่าความคงทนครั้งระดับสำหรับสี Lanaset Red G และ Lanaset Grey G แต่มีค่าไม่แตกต่างสำหรับผ้าไหมที่ย้อมด้วยสีย้อม Lanaset Yellow 2R

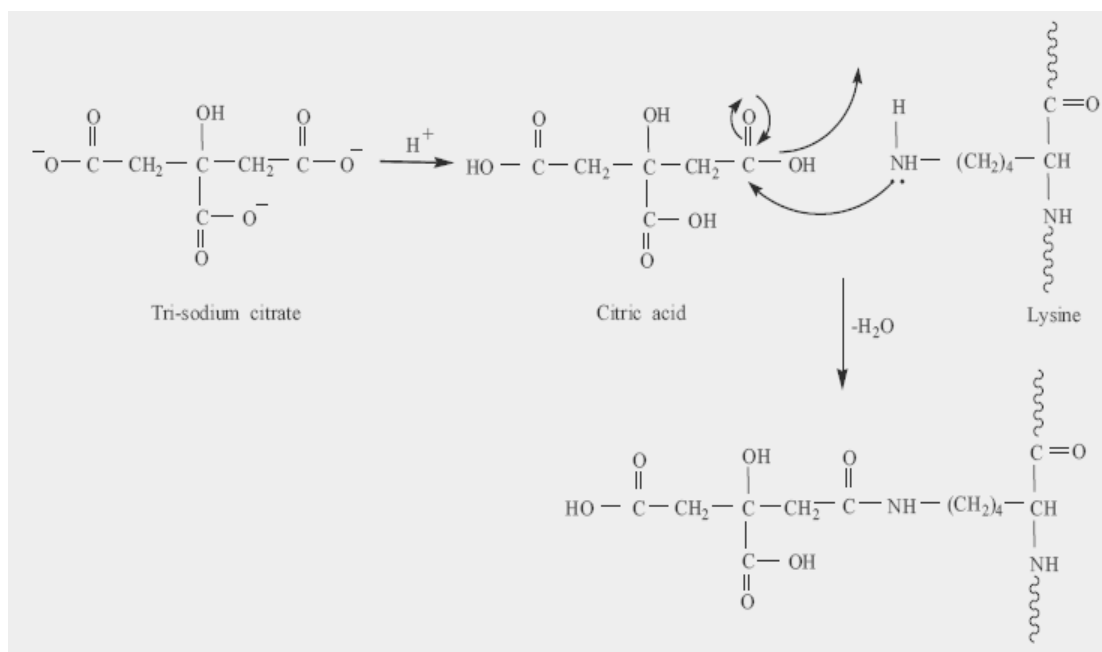
Leksophee *et al.* (2004) ทำการศึกษาสภาวะในการย้อมสีไหมร่วมกับสารสร้างพันธะต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผ้าไหม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ค่า pH ที่ 3.0, 4.5, 5.5 และ 7.0 อุณหภูมิที่ 80°C, 90°C, 100°C และ 110°C และความเข้มข้นของสารสร้างพันธะ ศึกษาที่ความเข้มข้น 1%, 3% และ 5% ของน้ำหนักผ้าไหม (o.w.f) และศึกษาสารสร้างพันธะ 4 ชนิด คือ โซเดียมซัลเฟต, กรดอะซิติก, กรดฟูมาริก และ Bis (4-fluoro-3-nitrophenyl) sulfone (BFNS) ซึ่งผลการศึกษพบว่า การย้อมสีไหมร่วมกับโซเดียมซัลเฟต 3% และย้อมร่วมกับกรดอะซิติก 3% ที่อุณหภูมิ 80°C pH 5.5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความคงทนของสีต่อการซักอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก ให้ค่าความคงทนต่อการขัดถู ความคงทนต่อแรงฉีกขาด และความขาวของผ้าไหมสูงที่สุด ซึ่งได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับกรดอะมิโนในหมู่เบส คือ กรดอะมิโนอาร์จินีน ดังภาพที่ 11 และกรดอะมิโนไลซีน ดังภาพที่ 12

Lacasse and Baumann (2004) แนะนำการปรับปรุงความคงทนของสีต่อการซัก ที่ย้อมด้วยสีแอซิด สีไดเรกต์ และสีเมทัลคอมเพลกซ์ ด้วยการทำ After treatment โดยแช่ใน 8% ของกรดแทนนิก และ 4% ของกรดอะซิติก (30%) ที่อุณหภูมิ 35-40°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ล้างด้วยน้ำที่เติม 4% potassium antimony (III) oxide tartrate ที่อุณหภูมิ 20-25°C นอกจากนี้ การทำ after treatment นี้ สำหรับผ้าไหมเป็นสิ่งจำเป็น โดยแช่เส้นใยในกรดฟอร์มิก, กรดอะซิติก, กรดแลคติก หรือ กรดซิตริก ปริมาณ 1-2 g/L



ภาพที่ 11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างไซเดียมซิเตรต และอาร์จินีน

ที่มา: Leksophee *et al.* (2004)



ภาพที่ 12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างไซเดียมซิเตรต และไลซีน

ที่มา: Leksophee *et al.* (2004)

6. ถ่านกัมมันต์

ระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ การบำบัดแบบกายภาพ การบำบัดแบบเคมี และการบำบัดแบบชีวภาพ ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงลักษณะของน้ำเสีย แหล่งกำเนิดน้ำเสีย และกิจกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสีย จึงจะสามารถเลือกใช้ระบบบำบัดให้เหมาะกับน้ำเสียได้ ซึ่งลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการข้มสีใหม่นั้น ขึ้นอยู่กับสีข้มที่นำมาใช้นั่นเอง ซึ่งลักษณะของสีข้มและแนวทางการเลือกระบบบำบัดน้ำเสีย แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้มในน้ำทิ้งโดยวิธีการต่างๆ

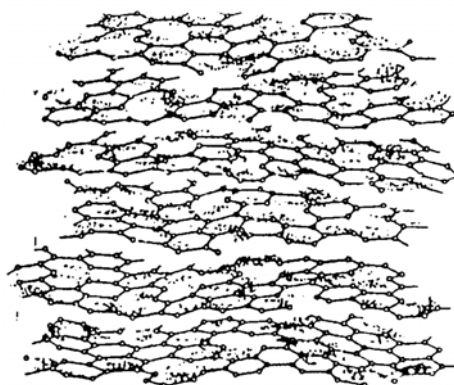
Dye Type	Solubility	Coagulation by Alum	Activated Carbon	Biological	Physicochemical Biological	Ozone	Sludge Adsorption
Acid	+	-	+	-	+	+	-
Basic	+	-	++	+	+	+	+
Direct	+	N	N	N	+	N	+
Reactive	+	-	+	-	+	++	-
Vat	-	+	-	-	+	+	N
Sulphur	-	+	-	-	+	+	N
Disperse	-	+	-	-	+	+	-

เมื่อ ++ = ให้ผลดีมาก + = ให้ผลดี - = ใช้ไม่ได้ N = ไม่มีข้อมูล

ที่มา: นันทยา (2537)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง สามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้ จึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์ เคมี ยา และน้ำดื่ม หรือใช้ในการดูดกลิ่นและฟอกสี นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลภาวะต่างๆ

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟต์ (Graphite) แต่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากกว่า และมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ อันเนื่องมากระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และอุณหภูมิในกระบวนการกระตุ้น (Faust and Aly, 1987) โดยโครงสร้างเป็นผลึกเล็กมาก (Microcrystallites) เป็นวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะทางระหว่างผลึกเล็กๆ มีค่า 20-50 อังสตรอม ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ที่มา: Faust and Aly (1987)

6.1 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ มี 2 ขั้นตอน ดังนี้

6.1.1 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และก๊าซ เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอน เพื่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยการทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระ โดยทั่วไปทำในสภาพอัดอากาศ ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้ควรมีสีดำตลอด เมื่อหักดู ส่วนที่หักดูจะมีผิวที่เป็นมันเงา ปลายที่หักจะแหลมคม และปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า แต่ยังสามารถในการดูดติดผิวดำ เนื่องจากโพรงภายในคาร์บอนยังมีทาร์ (Tar) อุดตันอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านกระบวนการออกซิไดส์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและไล่ทาร์ออกจากโพรงของคาร์บอนต่อไป

6.1.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process) โดยใช้ก๊าซซึ่งมีสมบัติในการออกซิไดส์ที่อุณหภูมิสูง โดยก๊าซส่วนใหญ่ที่ใช้ ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถใช้ผสมกันก็ได้ สำหรับความสามารถในการดูดซับหรือความจุของการดูดซับของคาร์บอนที่ได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยของกระบวนการกระตุ้น ดังนี้

- ก. คุณสมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของสารออกซิไดส์
- ข. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น
- ค. ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น
- ง. ปริมาณและชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของถ่าน

ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติทางเคมี ความเข้มข้นของก๊าซที่ออกซิไดส์ อุณหภูมิในปฏิกิริยา ปริมาณของสิ่งเจือปนที่ถูกกำจัดออกระหว่างการเผา เป็นต้น

6.1 รูปแบบของที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ (มันสิน, 2538)

6.2.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon: PAC) มีขนาดประมาณ 10-50 ไมโครเมตรหรือน้อยกว่า เหมาะสำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดซับและเร่งรัดของสารละลาย การดูดซับเกิดได้เร็ว เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง แต่การนำกลับมาใช้ใหม่ (Regenerate) มีราคาสูงและไม่คุ้มค่า จึงมักใช้แล้วทิ้ง

6.2.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon: GAC) มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทรายหรือน้ำ แต่เปราะและเบากว่าทราย เหมาะใช้สำหรับทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ หรือทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ สามารถนำไปรีเจนเนอเรตเพื่อนำกลับมาใช้ได้

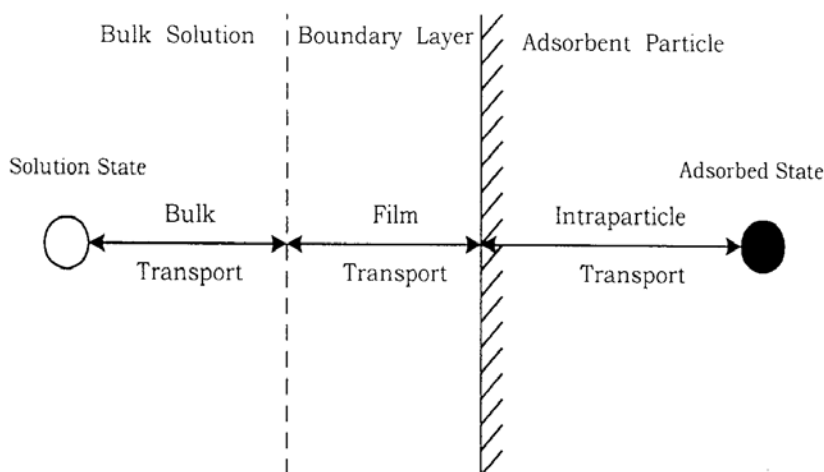
6.2 ทฤษฎีการดูดซับด้วยผงถ่าน (Carbon adsorption)

การดูดซับเป็นวิธีฟิสิกส์เคมี เพื่อเคลื่อนย้ายสาร จากก๊าซหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะ ดังนี้ (Eckenfelder, 1980; Metcalf and Eddy, 1972; Donald and Klei, 1979)

ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้าของชั้นฟิล์มของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดติดผิว ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นเร็วที่สุด

ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติดผิว โดยการแพร่ผ่านแผ่นฟิล์ม (Film diffusion) โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ส่งผลต่ออัตราการดูดติดผิวด้วย

ระยะที่ 3 เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลาย เข้าสู่รูพรุนหรือโพรงของสารดูดติดผิว (Pore diffusion) และเกิดการดูดติดผิวภายใน โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนจำกัดต่ออัตราการเกิดการดูดติดผิวเช่นกัน โดยขั้นตอนการดูดติดผิว แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

ที่มา: Eckenfelder (1980)

6.3 ประเภทการดูดซับ

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นที่ผิวของคาร์บอน โดยมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interaction) การดูดติดผิวแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) การดูดติดผิวทั้งสองนี้ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเคลื่อนเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ด้วยแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง ซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารในของเหลว ทั้งนี้การดูดติดผิวแบบกายภาพ แตกต่างจากการดูดติดผิวแบบเคมี ดังนี้

6.3.1 การดูดซับแบบกายภาพไม่ได้เป็นการใช้อิเลกตรอนร่วมกัน ดังนั้นปฏิกิริยาสามารถเกิดย้อนกลับได้ (Reversible) และการคายตัวสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากเกิดขึ้นแบบการแพร่ แต่การดูดซับทางเคมี จะเป็นการใช้พันธะเคมีดูดซับ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้

6.3.2 การดูดซับทางกายภาพเกิดได้อย่างอิสระ ไม่มีพื้นที่เฉพาะ พื้นที่ที่ใช้ในการดูดซับสามารถวัดได้จากสารที่ถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะมีพื้นที่เฉพาะในการดูดซับโมเลกุล

6.3.3 การดูดซับทางกายภาพ จะเกิดความร้อนน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี โดยจะมีความร้อนสูงประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนความร้อนในการดูดซับทางเคมี มีค่าประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมล ดังนั้นจึงสามารถใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นเกณฑ์ในการแยกประเภทของกระบวนการในการดูดซับได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London dispersion forces) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ซึ่งโมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้และจำนวนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ ได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ ในกรณีที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับนั้นมีขั้ว ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งจะดึงดูดเข้าหาขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนในกรณีที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับนั้นไม่มีขั้ว การดูดซับจะเกิดจากการกระจายตัวหรือการสั่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียส ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น การเข้าเกาะติดจึงเกิดได้ดีขึ้น การดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้มีค่าอ่อนลงจะทำให้เกิดการคายสารออก (Desorption) (Faust and Aly, 1987) การดูดซับทางเคมี เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น ซึ่งการดูดซับทางเคมีแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible)การคายสารออกของการดูดซับทางเคมีนั้น จะเกิดขึ้นเมื่อมีสารเคมีชนิดหนึ่งซึ่งเกิดปฏิกิริยากับสารที่

ถูกดูดซับได้ดีกว่าสารดูดซับ จากนั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับจึงจะคายตัวออกจากสารดูดซับได้ (Chereisinoff and Morresi, 1978; Reynolds and Richards, 1995)

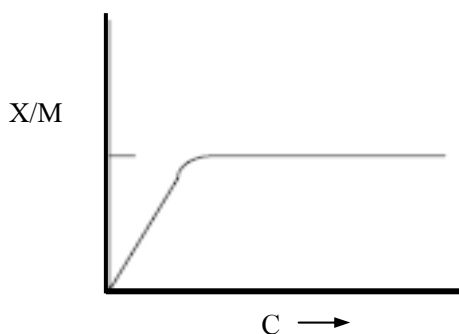
การดูดซับแบบเคมี จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้น จากการเกิดพันธะเคมี เช่น การหมุนตัวของอิเล็กตรอน การเกิดสนามแม่เหล็ก อันเกิดจากการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน (Faust and Aly, 1987)

6.4 สมการการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

กระบวนการดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง ซึ่งเมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายออก จึงเรียกว่า สมดุลการดูดซับ การแสดงปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)

6.4.1 Langmuir adsorption isotherm

สมมติฐานของสมการ เรียกว่า Localized monolayer model คือ โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถถูกดูดซับบนผิวสัมผัสของสารดูดซับในทุกตำแหน่งผิวสัมผัส การดูดซับเกิดบนพื้นผิวที่แน่นอน และสามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ผิวดูดซับ พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และไม่มีการทำปฏิกิริยาต่อกันของตัวถูกละลาย และในการดูดซับสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงว่าผิวของสารดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับในสัดส่วนที่มากขึ้น จนสารดูดซับเข้าสู่การอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ และที่จุดความเข้มข้นสูงเกินไปจะไม่เกิดการดูดซับสารใดๆ อีก ดังเช่นภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แบบจำลอง Langmuir isotherm

ที่มา: Metcalf and Eddy (1972)

สมการ Langmuir เขียนได้ดังแสดงในสมการ 6.4.1.1

$$q = \frac{q_0 C}{K + C} \quad (6.4.1.1)$$

โดย q คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับหนึ่งหน่วยมวล
(มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

q_0 คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุลต่อปริมาณสารดูดซับ
หนึ่งหน่วยมวล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

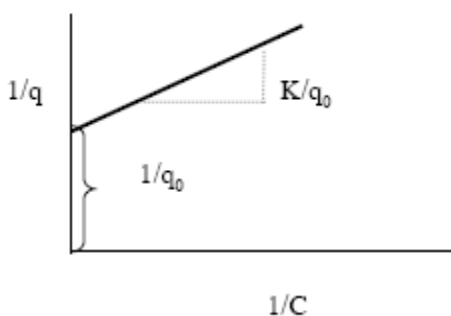
C คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย
(มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ ได้จากการทดลอง

จากสมการที่ 6.4.1.1 เขียนในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{K}{q_0 C} + \frac{1}{q_0} \quad (6.4.1.2)$$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ 6.4.1.1 และ 6.4.1.2 จะได้กราฟเส้นตรงดัง
แสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ลักษณะกราฟเส้นตรงตามสมการของ Langmuir

ที่มา: Faust and Aly (1987)

6.4.2 Freundlich adsorption isotherm

สมการ Freundlich เป็นสมการที่ใช้อย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับใน
ระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการ ดังนี้

$$q_e = KC_e^{1/n} \quad (6.4.2.1)$$

โดย q_e คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับหนึ่งหน่วยมวล

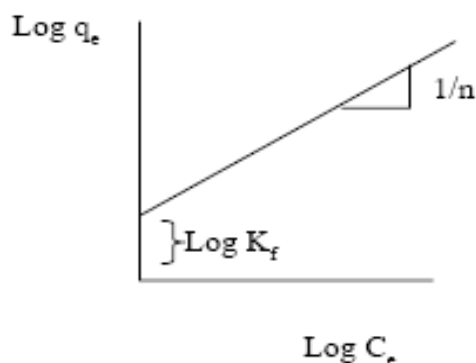
C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สมดุล

K และ n คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

จากสมการที่ 6.4.2.1 เขียนในความสัมพันธ์เชิงเส้น จะได้

$$\text{Log } q_e = \text{log } K_f + (1/n) \text{log } C_e \quad (6.4.2.2)$$

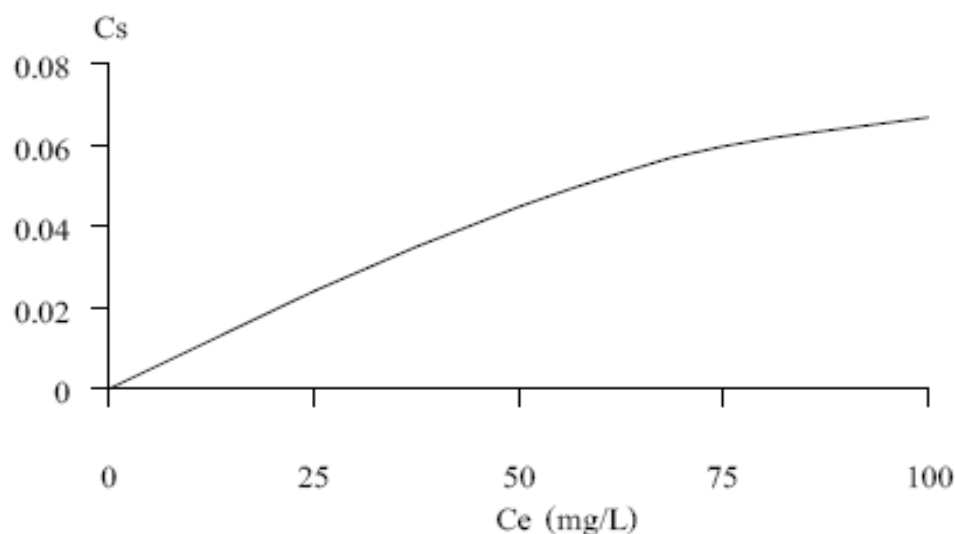
เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{log } q_e$ กับ $\text{log } C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง
ที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และตัดแกน y ที่ค่า $y = \text{log } K_f$ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich

ที่มา: Donald and Herbert (1979)

ค่าคงที่ $1/n$ และ K_f สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถในการดูดซับได้ โดยค่า $1/n$ แสดงถึง ความเร็วในการดูดซับ (Adsorption intensity) ค่า $1/n$ ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก จะทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำ อัตราการดูดซับจะลดลง และเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนเกือบชิดแกน x แสดงว่าที่ความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะมีค่าอัตราการดูดซับไม่แตกต่างกันนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะไอโซเทอมของ Freundlich จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีค่าสูงขึ้น ดังภาพที่ 18 ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการ Freundlich ที่สำคัญข้อหนึ่งคือ ทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



ภาพที่ 18 ลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ที่ความเข้มข้นสารถูกดูดซับต่างๆ
ที่มา: Fuast and Aly (1987)

6.5 คอลัมน์การดูดซับ (The adsorption column)

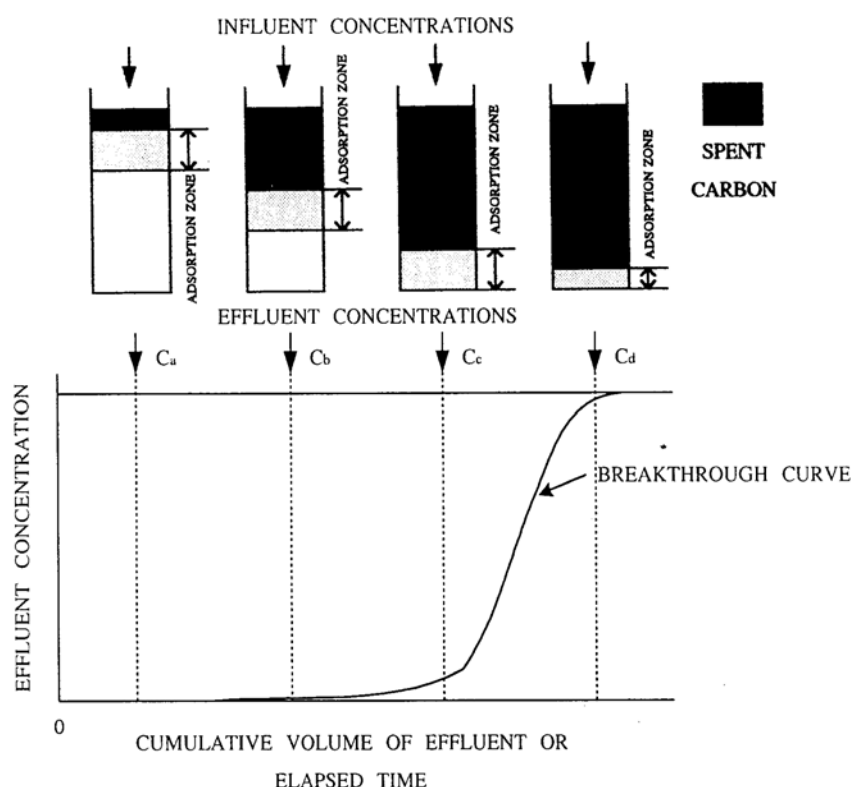
การป้อนของเหลวที่มีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นคาร์บอนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อดีกว่าการใช้แบบเบช (Batch) คือ อัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะสัมผัสชั้นของคาร์บอนในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

6.5.1 เขตการถ่ายเทมวลสาร (MTZ, Mass Transfer Zone) (Reynolds and Richards, 1995)

เมื่อมีการป้อนสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับ ด้วยอัตราการป้อนเข้าเท่ากับการไหลออก ตัวตัวดูดซับจะแพร่เข้าไปในตัวดูดซับและเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้การดูดซับมากเกินไปจนตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นในชั้นคาร์บอนที่อยู่ต่ำลงมา เขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดซับนี้ เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งความลึกของเขตการถ่ายเทมวลสารขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ ภาวะสมดุลของการดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับ ความลึกหรือความสูงของคอลัมน์หรือ Bed และอัตราเร็วของการป้อนสารละลาย

6.5.2 ลักษณะการหมดสภาพ (Breakthrough characteristics)

เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องของความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังภาพที่ 19 และแสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งหมดสภาพ กับปริมาณของชั้นถ่านที่หมดสภาพชั้นของถ่านที่ยังไวงาน (Active zone) และชั้นของถ่านที่ปราศจากสารที่ถูกดูดซับ



ภาพที่ 19 เส้นโค้งการหมดสภาพในคอลัมน์

ที่มา: Clark and Lykins (1989)

การหมดสภาพการดูดซับ (Breakthrough) ของคอลัมน์ คือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์มีค่าถึงจุดยอมรับได้มากที่สุด และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเกินจุดนี้แล้ว จะต้องทำการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ การหมดสภาพการดูดซับพิจารณาจากเส้นโค้งการหมดสภาพ โดยการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ และจะได้ค่า Bed volume (BV) โดยการหาปริมาตรสารที่ถูกบำบัด ด้วยปริมาตรถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ โดยค่า BV เป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์ในการหาค่าของขนาดที่แตกต่างของถ่านกัมมันต์ และ

อัตราเร็วที่แตกต่างของสารละลายภายในคอลัมน์ ความแตกต่างของเส้นโค้งการหมักสภาพ เกิดจากสาเหตุเดียวกับความแตกต่างของความกว้างของขอบเขตการถ่ายเทมวลสาร แต่โดยส่วนใหญ่ค่า Breakpoint จะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ คือ ค่า Breakpoint จะลดลงเมื่อตัวดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือการลดระดับความสูงของคอลัมน์ รวมทั้งการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายและการเพิ่มอัตราการไหลผ่านคาร์บอน (Eckenfelder, 1980)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ในศตวรรษที่ 10 ได้มีการนำถ่านมาใช้เป็นสารดูดซับในงานฟอกสีของอุตสาหกรรมน้ำตาล ต่อมาในปี 1785 Lowitz สามารถกำจัดกลิ่นและสีในน้ำโดยใช้ถ่าน และในปี 1860 ประเทศอังกฤษได้ใช้ถ่านกำจัดรสและกลิ่นในน้ำดื่ม ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาใช้ถ่านในกระบวนการผลิตน้ำประปา และบำบัดน้ำเสียจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม

2. มีการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อม พบว่า การทดลองใช้ Activated carbon column ซึ่งบรรจุชั้นของ Powder activated carbon สามารถดสีและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดีกว่าวิธีโคแอกกูเลชัน (สมชาย, 2524)

3. การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถบำบัดสีได้เป็นที่น่าพอใจ แต่กระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon adsorption) ตามด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation) สามารถบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากโรงงานทอผ้าได้ (ศิริอุมา, 2541)

4. สุจินต์ (2544) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสี ด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยได้ศึกษาที่อัตราน้ำล้นผิวที่ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.2 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ พบว่าที่อัตราน้ำล้นผิวดำ มีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าที่อัตราน้ำล้นผิวสูง และพบว่าที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 80 cm มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงสุด (ทำการศึกษาที่ความสูง 20, 50 และ 80 cm จากฐานคอลัมน์) แต่เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีนี้มีต้นทุนสูง จึงแนะนำให้บำบัดร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่น หรือบำบัดน้ำเสียที่ได้มาตรฐานแล้ว แต่ยังเหลือสีตกค้าง ที่ยังไม่สามารถบำบัดได้ จึงใช้วิธีการบำบัดด้วยวิธีการดูดซับนี้

5. ศิริอุมา (2541) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอต่อการกำจัดสี COD ความขุ่น และของแข็งแขวนลอย โดยการตกตะกอนเคมีด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต กับกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ได้ผลการศึกษาเป็นร้อยละ 66.24, 64.09, 94.78 และ 52.07 ตามลำดับ ส่วนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้ผลเป็นร้อยละ 60.03-83.31, 68.15-84.91, 44.40-70.30 และ 58.34-83.32 ตามลำดับ ดังนั้นการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีกว่า และได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดได้ดีที่สุด

6. ปัญญา (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสี โดยชั้นกรองทรายร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 73.60-85.20 ความขุ่นร้อยละ 82.75-86.78 ของแข็งแขวนลอยร้อยละ 75.93-85.98 และประสิทธิภาพการบำบัด COD ร้อยละ 72.40-81.00 เนื่องจากถ่านกัมมันต์ เมื่อดูดซับอนุภาคสี สารอินทรีย์ และมลสารต่างๆ แล้ว จะทำให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนลดลง ดังนั้นชั้นกรองทรายจะช่วยกำจัดความขุ่น สารแขวนลอย ออกก่อน ซึ่งจะช่วยลดภาระของถ่านกัมมันต์ ทำให้สามารถกำจัดสี ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้

7. เพ็ญลักษณ์ (2004) ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมไครเร็กซ์ สิริแอคทีฟ สีดิสเพิร์ส และสีแอซิด โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากซีเป้ง เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ในท้องตลาด โดยการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านซีเป้ง พบว่าดูดซับสีไครเร็กซ์ สิริแอคทีฟ สีดิสเพิร์ส และสีแอซิด ได้ 14.40, 13.31, 2.42 และ 48.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ ดูดซับสีได้ 73.03, 16.19, 18.62 และ 2,171.89 มิลลิกรัมต่อลิตร

7. Elizajde-Gonzalez and Palaez-cid (2003) ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้าโดยวิธีการดูดซับด้วยวัสดุเหลือใช้ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยเลือกใช้ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดและจากกะลามะพร้าว พบว่า ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดสามารถกำจัดสีย้อมผ้าได้ดีกว่า โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีเบสิกร้อยละ 87-98 สิริแอคทีฟร้อยละ 60-98 และสีแอซิดร้อยละ 60-70

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 ผ้าไหมไทย

เป็นผ้าไหมที่ไม่ได้ผ่านการฟอกขาวและการย้อม มีน้ำหนัก 96 กรัม/ตารางเมตร ทอแบบลายขัด (Plain weaving) โดยใช้เส้นด้ายยืน 1 เส้นต่อเส้นด้ายพุ่ง 2 เส้น สำหรับลักษณะของเส้นด้ายไหม แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ลักษณะของเส้นด้ายไหมที่ใช้ในงานวิจัย

	ขนาดเส้นด้าย (ดีเนียร์)	จำนวนเส้นด้ายทอ (เส้นต่อนิ้ว)	เกลียวของเส้นด้าย	
			ชนิดของเกลียว	จำนวนเกลียว (รอบต่อนิ้ว)
เส้นด้ายยืน (Warp)	54.90	104	S	10.25
เส้นด้ายพุ่ง (Wef)	153.00	124	Z	2.25

1.2 คอลัมน์แก้ว สูง 70 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร

1.3 ถ่านกัมมันต์ ขนาดน้อยกว่า 0.2 x 0.2 มิลลิเมตร

2. เครื่องมือ

2.1 ปั๊ม (Pump) รุ่น 505 S Watson malow ประเทศอังกฤษ

2.2 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) Thermo Spectronic รุ่น Genesys 20 ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.3 เครื่องเขย่า (Shaker) Gallenkamp Orbital Shaker รุ่น SGM 300

- 2.4 เครื่อง Centrifuge Spectraforce 16M ของ National Labnet, USA.
- 2.5 พีเอชมิเตอร์ Denver instrument Model 215
- 2.6 เครื่องชั่งวิเคราะห์ (Analytical Balance) 2 ตำแหน่ง Avery Berkel รุ่น FA313
- 2.7 ตู้อบ (Oven) บ. Keraeus instruments รุ่น T-6120, Germany
- 2.8 เครื่องย้อมระบบ Infrared Dyeing Machine
- 2.9 Spectrophotometer (Spectraflash 500 , Datacolor International) สำหรับวัดความขาวและความแตกต่างของสี
- 2.10 เครื่องทดสอบความคงทนต่อการขัดถู Martindale Wear & Abrasion Tester
- 2.11 เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงฉีกขาด Elmendorf Tearing Tester
- 2.12 เครื่องทดสอบความสามารถในการคืนตัวต่อการยับ Crease Recovery Tester
- 2.13 เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก Nuance dyer (Ahiba, Datacolor International)
- 2.14 Scanning Electron Microscope (SEM) ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเส้นใยไหมหลังผ่านกระบวนการทดสอบความคงทนต่อการขัดถู โดยส่งวิเคราะห์สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. สารเคมี

3.1 สีย้อม ได้รับความอนุเคราะห์จาก จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals Industries, Ltd. Thailand ได้แก่

- 3.1.1 Cibacron Blue P-3R (Cibacron Blue)
- 3.1.2 Cibacron Red H-B (Cibacron Red)
- 3.1.3 Cibacron Navy WBT crude (Cibacron Navy)
- 3.1.4 Lanaset Grey G (Lanaset Grey)
- 3.1.5 Erionyl Red A-2BF (Erionyl Red)
- 3.2 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30%
- 3.3 สารเตตระโซเดียมฟอสเฟต
- 3.4 สาร TWEEN 20 (Nonionic surfactant)

- 3.5 สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ pH 5.5 (เตรียมจากสารโซเดียมอะซิเตต และกรดอะซิติก)
- 3.6 กรดซิตริก AR Grade
- 3.7 สารโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) AR Grade
- 3.8 กรดซัลฟูริก AR Grade
- 3.9 สารซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) AR Grade
- 3.10 สารเมอร์คิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$) AR Grade

วิธีการ

1. การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผ้าไหม

1.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของผ้าไหม

1.1.1 จำนวนเส้นพุ่ง เส้นยืนต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว

1.1.2 น้ำหนักผ้าไหมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร

1.1.3 การเกลียวของเส้นด้าย ชนิดและจำนวน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM test method D1422-85

1.2 การฟอกขาวผ้าไหมแบบออกซิเดทีฟ (Leksophee *et al.*, 2004)

สารละลายประกอบด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% 22 มิลลิลิตร/ลิตร เตตระโซเดียมไพโรฟอสเฟต (Stabilizer) 6 กรัม/ลิตร และ tween 20 (Nonionic surfactant) 1 หยดต่อลิตร ใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรสารละลายต่อน้ำหนักผ้า (Liquor ratio) 20:1 ค่า pH 8 – 8.5 (ปรับ pH โดยใช้กรดอะซิติก หรือแอมโมเนีย) อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากฟอกขาวแล้วล้างน้ำ แล้วนำไปผึ่งให้แห้งในที่ร่มไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง

นำผ้าไหมฟอกขาวที่แห้ง ไปรีดที่อุณหภูมิ 100°C-120°C ขณะรีดใช้ผ้าฝ้ายหนาทับบนผ้าไหม เพื่อป้องกันการสัมผัสกับความร้อนจากโลหะโดยตรง จากนั้นนำไปทดสอบความขาว ความคงทนต่อแรงฉีกขาด ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับ ความคงทนต่อการซัก และลักษณะการขาดของเส้นใยไหมหลังจากผ่านการทดสอบความคงทนต่อการซัก

1.3 การย้อมสีผ้าไหม (Leksophee *et al.*, 2004)

นำผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาวแล้วมาย้อมสีที่ 3% ของน้ำหนักผ้า (o.w.f) ในสารละลายอะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 5.5 ความเข้มข้น 0.2M โดยในการศึกษานี้แบ่งกลุ่มการทดสอบเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ผ้าไหมและน้ำกลั่น กลุ่มที่ 2 ผ้าไหมและน้ำสี (ปริมาณสี 3% o.w.f) กลุ่มที่ 3 ผ้าไหม น้ำสี

(ปริมาณสี 3% o.w.f) และอะซิเตดบัฟเฟอร์ 0.2M pH 5.5 และกลุ่มที่ 4 ผ้าไหม น้ำสี (ปริมาณสี 3% o.w.f) อะซิเตดบัฟเฟอร์ 0.2M pH 5.5 และกรดซิตริก 3% o.w.f

การย้อมสีผ้าไหม ย้อมที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างน้ำ ผึ่งให้แห้งในที่ร่ม ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปวัดความแตกต่างของสี ทดสอบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยไหม ความคงทนต่อการขัดถู ความคงทนต่อแรงฉีกขาด ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับ และความคงทนของสีต่อการซัก

1.4 การทดสอบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยไหม

1.4.1 ศึกษาสมบัติความขาว โดยนำตัวอย่างผ้าไหมวัดค่าความขาว (CIE Whiteness Index) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

1.4.2 ความคงทนต่อการขัดถู เตรียมขนาดตัวอย่างผ้าไหมตามวิธีมาตรฐาน โดยเครื่อง Martindale wear & Abrasion tester ตามวิธีของ British Standard (BS 5690: 1991) ทำการทดลองจนเส้นด้ายขาด 2 เส้น

1.4.3 ความคงทนต่อแรงฉีกขาด เตรียมขนาดตัวอย่างผ้าไหมตามวิธีมาตรฐาน ทดสอบโดยเครื่อง Elmendorf tearing tester ตามวิธีของ ASTM D – 1424: 1983

1.4.4 ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับ เตรียมขนาดตัวอย่างผ้าไหมตามวิธีมาตรฐาน โดยเครื่อง Crease recovery tester ตามวิธีของ British Standard (BS EN 22313: 1992)

1.4.5 ความคงทนของสีต่อการซัก ทำการซักโดยเครื่อง Nuance dyer และวัดความแตกต่างของสีของผ้าไหม และสีของน้ำย้อมด้วยเครื่อง Spectrophotometer

1.4.6 โครงสร้างจุลภาค เพื่อคุณลักษณะการขาดของผ้าไหมที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อการขัดถู ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีไหม

2.1 การวัดความเข้มข้นของสีย้อม

เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างไปเหวี่ยงเพื่อแยกของแข็งที่ปะปนอยู่ออก โดยใช้ microcentrifuge ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำส่วนใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมต่อไป

ความเข้มข้นของสีย้อมสังเคราะห์ Cibacron Red, Cibacron Navy, Cibacron Blue, Lanaset Grey และ Erionyl Red ในสารละลาย หาได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมแต่ละสี โดยสีย้อม Cibacron Navy วัดที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร สีย้อม Cibacron Blue วัดที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร สีย้อม Cibacron Red วัดที่ความยาวคลื่น 505 นาโนเมตร สีย้อม Lanaset Grey วัดที่ความยาวคลื่น 585 นาโนเมตร และสีย้อม Erionyl Red วัดที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสง คำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมจากกราฟมาตรฐาน ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีย้อม โดยความเข้มข้นของสีย้อม มีค่าเท่ากับค่าการดูดกลืนแสงหารด้วยความชันของกราฟมาตรฐานของแต่ละสีย้อม

การวัดความเข้มข้นของน้ำสีผสม (ของสีย้อมทั้ง 5 สี) โดยวัดที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงมากที่สุดของตัวอย่างน้ำเสีย คือ ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มอีก 3 ค่าความยาวคลื่นตามมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม ซึ่งดัดแปลงจาก German Standard Methods for the Examination of Water, Wastewater and Sludge (1994) คือ ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร แทนค่าการดูดกลืนแสงสีแดง ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร แทนค่าการดูดกลืนแสงสีเขียว และความยาวคลื่น 436 นาโนเมตร แทนค่าการดูดกลืนแสงสีเหลือง

2.2 การวิเคราะห์ COD

การวิเคราะห์ COD ตาม Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater. 1998. 20th Edition.

3. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red ของถ่านกัมมันต์

3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

ล้างถ่านกัมมันต์และแช่ให้อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น 1 คืน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในเคซิเคเตอร์ แล้วนำมาคัดแยกขนาดด้วยตะแกรง ขนาด 0.2 x 0.2 มิลลิเมตร

3.2 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์

ใช้ถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 4.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) สำหรับสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Red และ Lanaset Grey และถ่านกัมมันต์หนัก 3.5 กรัม สำหรับสีย้อม Cibacron Blue และ Erionyl Red และเทลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทั้ง 5 ชนิด ความเข้มข้น 10, 20, 50, 70 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร รวมทั้งชุดควบคุมที่ใช้ น้ำกลั่นแทนสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นนำไปเข้าเครื่องเขย่า ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่าง ทุก 30 นาที แล้วนำไปวัดความเข้มข้นสีย้อม จนการดูดซับเข้าสู่สมดุล

4. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมไหม ด้วยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์

ใช้ถ่านกัมมันต์ที่คัดขนาดด้วยตะแกรงกรองขนาด 0.2 x 0.2 มิลลิเมตร บรรจุลงในคอลัมน์สูง 50 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ ต่อกันแบบอนุกรม โดยป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านบนลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ที่ 1 แล้วต่อเข้าสู่คอลัมน์ที่ 2 ทางด้านบนลงสู่ด้านล่าง (ภาพที่ 20) โดยศึกษาที่อัตราการไหล 4.7 ml/min และ 7.3 ml/min ปริมาตรน้ำเสียที่ป้อนเข้าประมาณ 1 ลิตร ดังนั้นจะใช้เวลา 200 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหล 4.7 ml/min เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากคอลัมน์ทุก 10 นาทีในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นเก็บทุก 20 นาที จนครบ 200 นาที สำหรับที่อัตราการไหล 7.3 ml/min เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 10 นาที เพื่อนำตัวอย่างน้ำเสีย มาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม ปริมาณ COD และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ



ภาพที่ 20 ระบบบำบัดน้ำเสียที่ทำการศึกษา โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

5. สถานที่ทำการทดลอง

5.1 ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

5.2 ภาควิชาสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

5.3 สถาบันพัฒนาสิ่งทอ กล้วยน้ำไท กรุงเทพฯ

6. ระยะเวลาในการทดลอง

การทดลองนี้เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2548 และสิ้นสุดเดือนเมษายน พ.ศ. 2550

ผลและวิจารณ์

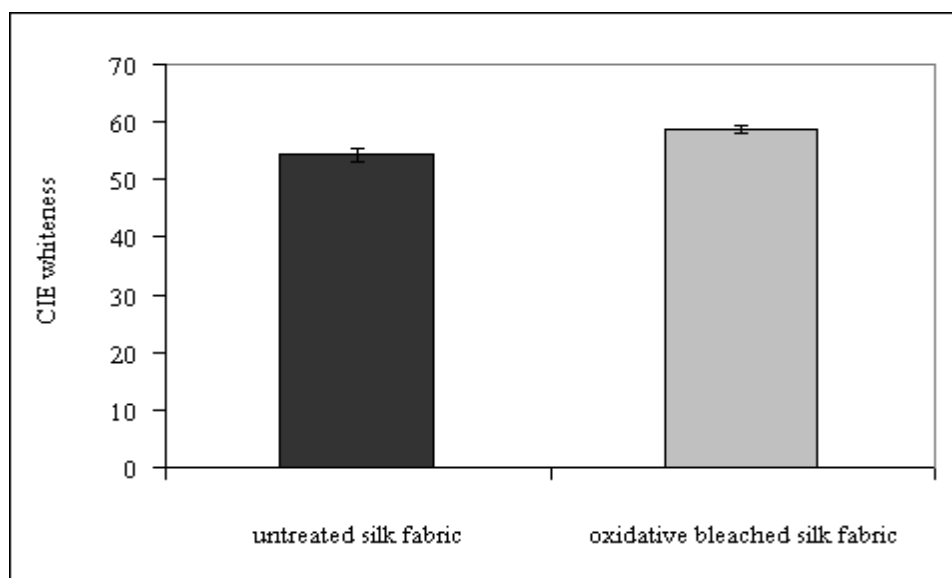
การศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหม การฟอกขาวผ้าไหม การย้อมสี และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม และในส่วนที่สองเป็น การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีไหมด้วยถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์

สีย้อมที่ศึกษา ประกอบด้วย สีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red จัดเป็นสีสังเคราะห์ ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งในด้านวิธีการย้อมและ โครงสร้างทางเคมี โดยเมื่อแบ่งตามวิธีการย้อมสี สีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue และ Cibacron Red จัดเป็นสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟ ส่วนสีย้อม Lanaset Grey และ Erionyl Red จัดเป็น สีย้อมประเภทสีแอซิด แต่เมื่อแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีของสี พบว่าสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Red และ Erionyl Red จัดเป็นสีประเภท Azo dye สีย้อม Cibacron Blue เป็นประเภท Anthraquinone dye และสีย้อม Lanaset Grey เป็นประเภท Metal complex dye คือมีโลหะเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล

1. สมบัติของตัวอย่างผ้าไหม

1.1 ความขาวของผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาว

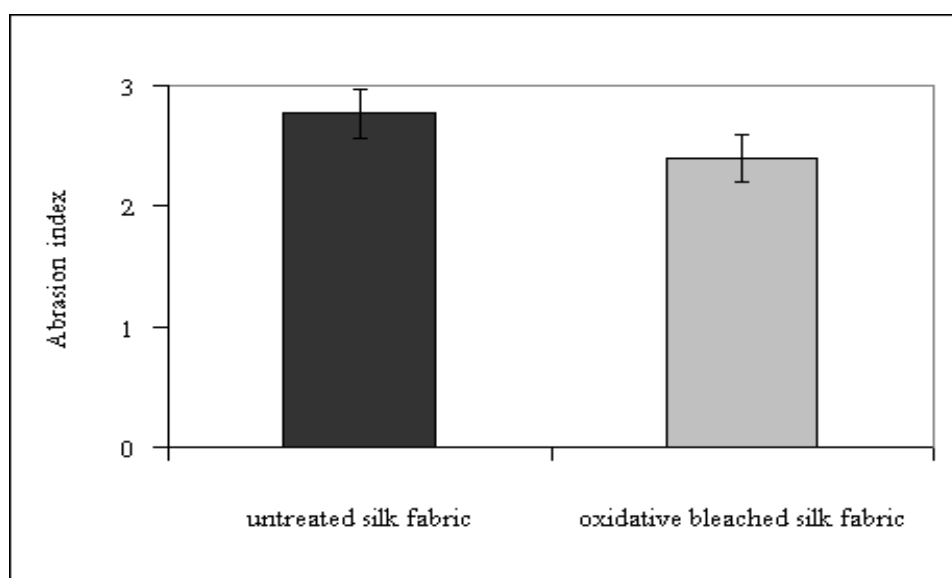
ในการศึกษานี้ใช้วิธีการฟอกขาวแบบออกซิเดทีฟ ที่อุณหภูมิ 60°C 1 ชั่วโมง พบว่าผ้าไหมมีค่าความขาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.11 เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่ได้ฟอกขาว เนื่องจาก ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่นำมาใช้ในการฟอกขาวผ้าไหมนั้น จะแตกตัวได้สารที่เรียกว่า Active oxygen คือ เพอร์ไฮดรอกซิลไอออน (HO_2^-) ซึ่งสามารถทำลายสารมีสีได้ ดังภาพที่ 21 (กลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ(เคมีสิ่งทอ), 2001; Karmakar, 1999) จึงทำให้ผ้าไหมมีความขาวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้วิธีการฟอกขาวแบบออกซิเดทีฟ เป็นวิธีที่ใช้กับเส้นใยโปรตีนได้ ไม่ทำให้เส้นใยเหลือง และไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องมือและสิ่งทอที่ฟอกขาว (Peter, 1967; Leksophe et al., 2004)



ภาพที่ 21 ผลของการฟอกขาวต่อความขาวของผ้าไหม

1.2 ความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาว

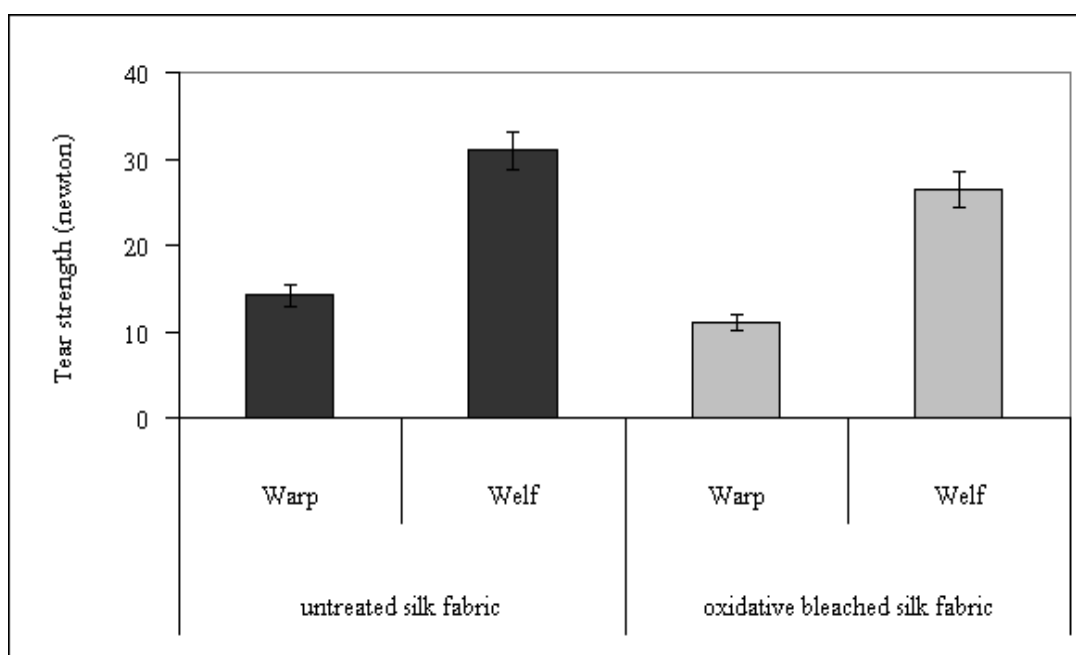
ความคงทนของผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาวต่อการขัดถูมีค่าลดลงร้อยละ 13.15 เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการฟอกขาว เนื่องจากเส้นใยไหมถูกทำลาย จากสภาวะการฟอกขาวโดยเกิดการทำลายพันธะของสายพอลิเพปไทด์ (โมโตอิและคณะ, 2530; Karmakar, 1999; วีระศักดิ์, 2003) ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ผลของการฟอกขาวต่อความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหม

1.3 ความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาว

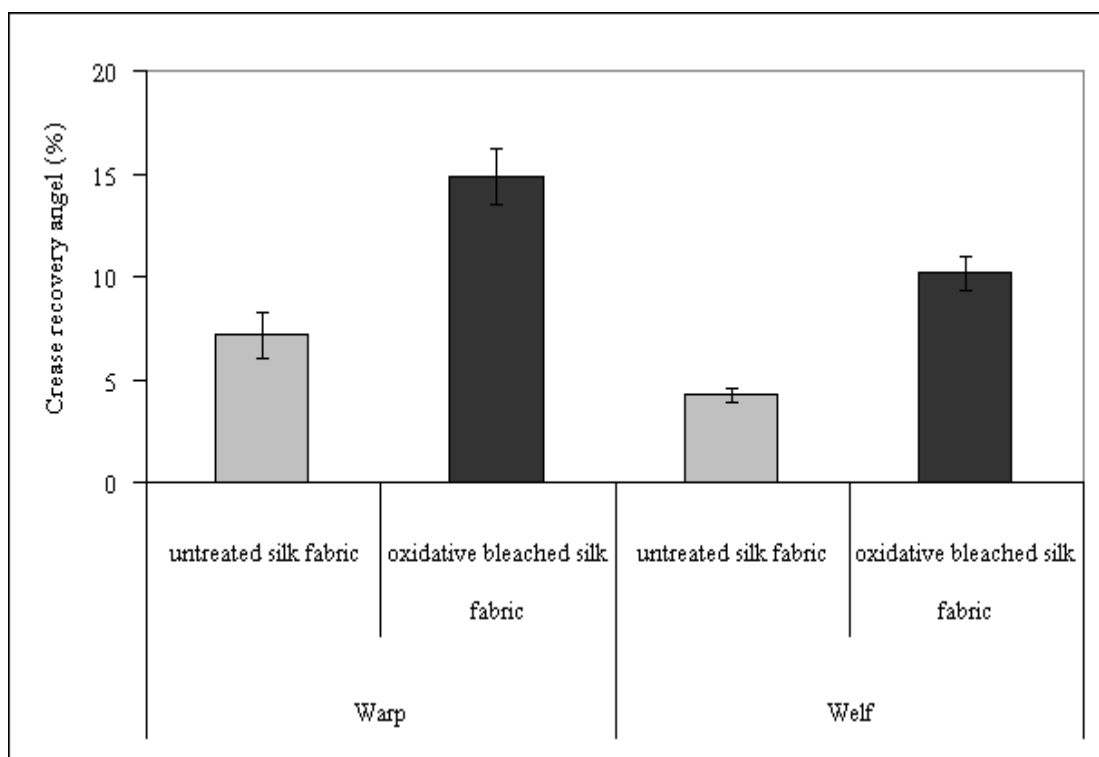
ผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาวมีค่าความคงทนต่อแรงฉีกขาดของเส้นด้ายยืน และเส้นด้ายพุ่งลดลงร้อยละ 22.37 และ 14.53 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่ผ่านการฟอกขาว ดังภาพที่ 23 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความคงทนต่อการฉีกขาด



ภาพที่ 23 ผลของการฟอกขาวต่อความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหม

1.4 ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาว

ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาวของเส้นด้ายยืน และเส้นด้ายพุ่ง มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 51.87 และ 58.18 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่ได้ผ่านการฟอกขาว อาจเนื่องจากการฟอกขาว เซรีซินซึ่งเป็นโปรตีนมีลักษณะเหนียวเหมือนกาวที่ช่วยยึดเส้นใยไหมไว้ ถูกขจัดออกไปด้วย จึงทำให้เส้นไหมสามารถคืนตัวจากการยับได้ดีขึ้น ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ผลของการฟอกขาวต่อความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหม

2. การย้อมสีผ้าไหม และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้ามต่อสมบัติทางกายภาพของผ้าไหม

2.1 การติดสีย้อม และความแตกต่างของสีผ้าไหมที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ และสีแอซิด และการย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

สีสังเคราะห์ที่นำมาศึกษาย้อมผ้าไหม คือ สีรีแอคทีฟและสีแอซิด ซึ่งสีรีแอคทีฟ ประกอบด้วย Cibacron Navy Cibacron Blue และ Cibacron Red และสีแอซิดประกอบด้วย Lanaset Grey และ Erionyl Red สีย้อมแอซิดมีสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมคือสภาวะที่เป็นกรด ส่วนสีย้อมรีแอคทีฟสภาวะที่เหมาะสมในย้อมคือ สภาวะที่เป็นด่าง สำหรับการศึกษาย้อมผ้าไหม ย้อมที่สภาวะ pH 5.5 อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแบ่งกลุ่มการศึกษาเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม B คือ ผ้าไหมย้อมร่วมกับน้ำย้อมสี กลุ่ม C คือ ผ้าไหมย้อมร่วมกับน้ำย้อมสีและอะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 5.5 และกลุ่ม D คือ ผ้าไหมย้อมร่วมกับน้ำย้อมสี อะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 5.5 และกรดซิตริก 3% o.w.f

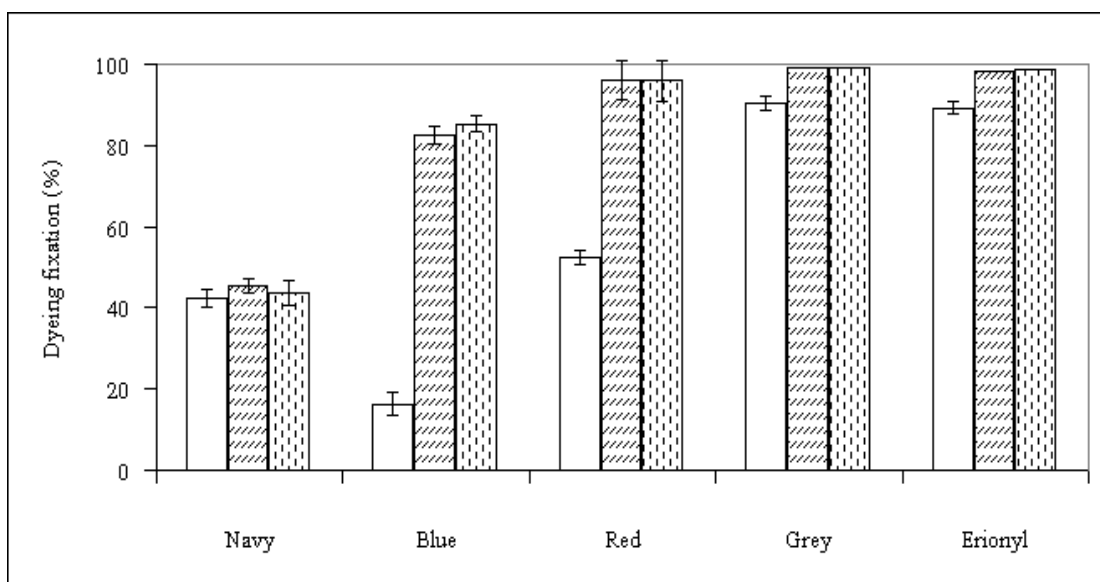
ผลการทดลอง โดยรวมสรุปได้ว่า ตัวอย่างสีรีแอคทีฟ ซึ่งมีสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมที่สภาวะที่เป็นด่าง แต่ได้นำมาย้อมที่สภาวะกรด ที่ pH 5.5 โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์ที่ผ้าไหมติดสีย้อม ซึ่งวัดจากความเข้มข้นของสีในน้ำย้อมที่ก่อนและหลังการย้อมสีผ้าไหม โดยพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผ้าไหมกลุ่ม B ซึ่งไม่มีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์และกรดซิตริก โดยกรดซิตริกนำมาใช้เพื่อเป็นสารสร้างพันธะข้าม โดยสี Cibacron Navy มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 42.48, 45.39 และ 43.69 ในกลุ่ม B, C และ D ตามลำดับ สี Cibacron Blue มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.26, 82.55 และ 85.28 ตามลำดับ และสี Cibacron Red มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 52.50, 96.024 และ 95.87 ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี โดยการวัดค่า CIELab Color Difference พบว่าสัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์การติดสีย้อมของผ้าไหม โดยเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (DE*) ของทุกตัวอย่างสี ผ้าไหมกลุ่ม C และ D มีค่า DE* เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผ้าไหมกลุ่ม B ที่ไม่มีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์และกรดซิตริก และจากการย้อมสี Cibacron Blue และ Cibacron Red พบว่าผ้าไหมกลุ่ม B มีสีอ่อนกว่ากลุ่ม C และ D อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของสี ดังตารางที่ 5

สำหรับสีแอซิดทั้งสี Lanaset Grey และสี Erionyl Red มีค่าเปอร์เซ็นต์การติดสีย้อมเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผ้าไหมกลุ่ม B ที่ไม่มีการเติมบัฟเฟอร์และกรดซิตริกเช่นเดียวกับสีรีแอคทีฟ แต่เนื่องจากสภาวะการย้อมสีเป็นสภาวะที่เหมาะสมของสีแอซิด ค่าเปอร์เซ็นต์การติดสีย้อมของผ้า

ไหมทั้ง 3 กลุ่มจึงมีค่าสูง คือมีค่าประมาณร้อยละ 90 ในผ้าไหมกลุ่ม B และผ้าไหมในกลุ่ม C และ D มีค่าประมาณร้อยละ 99 และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี พบว่าผ้าไหมมีค่า DE* เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผ้าไหมกลุ่ม B แต่มีค่าแตกต่างไม่สูงมากนัก ซึ่งสัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์การติดสีข้อมันเอง แสดงผลดังภาพที่ 25 และตารางที่ 8

โดยทั่วไปนั้น ทางอุตสาหกรรมสิ่งทอจะให้การยอมรับค่า DE* ได้ไม่เกิน 1-2 หน่วย โดยขึ้นกับสีข้อมและทิศทางการเบี่ยงเบนของสี (ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ, 2542) แต่สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการติดสีของผ้าไหมที่ข้อมสี และข้อมสีร่วมกับกรดซิตริก ซึ่งเป็นสารสร้างพันธะข้าม จึงนำค่าดังกล่าวมาใช้เป็นเกณฑ์ไม่ได้ เนื่องจากมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาต่างกัน ซึ่งค่า DE* ของผ้าไหมในกลุ่ม D เมื่อเทียบกับผ้าไหมกลุ่ม B มีค่าความแตกต่างของสีมากกว่า 1 หน่วย ในทุกตัวอย่างสีข้อมที่นำมาศึกษา นั้นแสดงว่ากรดซิตริกสามารถช่วยเพิ่มการติดสีข้อมให้แก่ผ้าไหมได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การติดสีข้อม จะเห็นว่ามีค่าไปในทิศทางเดียวกัน

เมื่อพิจารณาสีข้อมที่เป็นสีอ่อน คือ สีข้อม Cibacron Blue, Cibacron Red และ Erionyl Red มีค่าความสดใสของสี (C*) ของผ้าไหมในกลุ่มที่มีการเติมกรดซิตริก เพิ่มขึ้นร้อยละ 70.67, 82.93 และ 3.52 เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ไม่มีการเติมบัฟเฟอร์และกรดซิตริก



ภาพที่ 25 เปอร์เซ็นต์การติดสีของผ้าไหม ที่ผ่านการข้อมสี และข้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

เมื่อ □ = Silk with dyes ▨ = Silk with dyes and buffer

และ ▩ = Silk with dyes, buffer and citric acid 3% o.w.f

ตารางที่ 8 ค่าความแตกต่างของสี (CIELAb Color Difference) ของผ้าไหมที่ผ่านการย้อม
ด้วยสีรีแอคทีฟและสีแอซิด ร่วมกับกรดซิตริก

	Sample	Color Difference (DE*)	Lightness Difference (DL*)	a*	b*	Chroma (C*)
Cibacron Navy	B	0.693	-0.327	-8.103	-16.467	18.352
	C	5.076	4.883	-8.435	-15.460	17.612
	D	6.405	6.216	-8.555	-15.005	17.275
Cibacron Blue	B	1.665	1.325	-4.335	-22.455	22.870
	C	22.569	-15.994	-0.262	-38.580	38.590
	D	23.106	-16.268	-0.067	-39.030	39.033
Cibacron Red	B	1.060	0.310	30.703	-4.787	31.075
	C	36.790	-25.750	56.662	0.412	56.665
	D	37.028	-25.900	56.843	0.460	56.845
Lanaset Grey	B	0.563	0.536	-1.035	-8.438	8.503
	C	1.308	-1.083	-0.877	-8.007	8.055
	D	1.578	-1.490	-0.708	-7.977	8.007
Erionyl Red	B	1.247	-1.166	53.567	15.050	55.642
	C	5.808	-3.892	54.340	18.847	57.522
	D	5.223	-3.395	54.530	18.537	57.598

หมายเหตุ B = Dye without citric acid C = Dye with acetate buffer pH 5.5

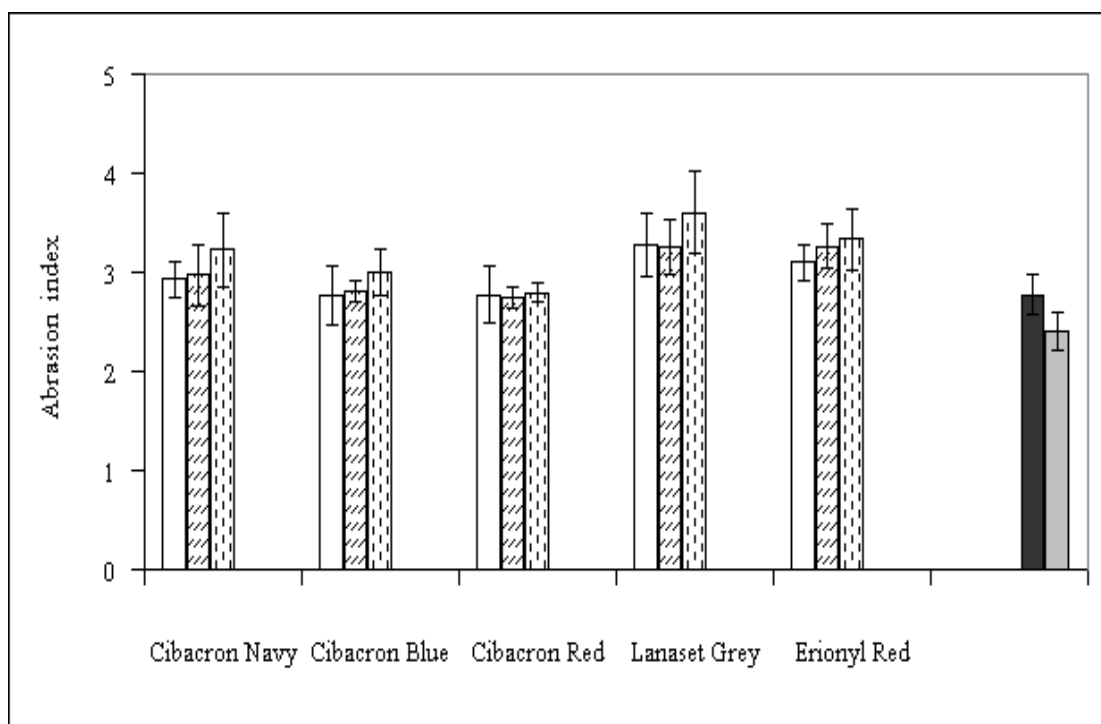
D = Dye with acetate buffer pH 5.5 and citric acid 3% o.w.f

2.2 ความคงทนต่อการขจัดของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสี และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

การศึกษาความคงทนต่อการขจัดของผ้าไหม ที่ผ่านกระบวนการย้อมสี และการย้อมร่วมกับกรดซิตริก พบว่าผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาวจะมีความแข็งแรงของเส้นใยต่อการขจัดลดลงร้อยละ 13.15 เทียบกับผ้าไหมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการฟอกขาว เนื่องจากสภาวะการถูกทำลายของเส้นใยด้วยการฟอกขาว และเมื่อศึกษาผลของกรดซิตริกต่อการสร้างพันธะข้าม ทดแทนพันธะที่ถูกทำลายไป จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความคงทนต่อการขจัดของผ้าไหม มีค่าเพิ่มขึ้นจากกลุ่ม B ซึ่งไม่มีการเติมบัฟเฟอร์ และกรดซิตริกในน้ำย้อม กลุ่ม C ซึ่งมีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 5.5 และกลุ่ม D ซึ่งเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 5.5 และกรดซิตริก ตามลำดับ

สี Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red มีค่าความคงทนต่อการขจัดเมื่อเทียบกับผ้าไหมกลุ่ม B ซึ่งไม่มีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์และกรดซิตริก ในน้ำย้อมพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.31, 8.73, 0.63, 9.76 และ 7.64 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ผ่านกระบวนการฟอกขาว พบว่าผ้าไหมที่มีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์และกรดซิตริกในน้ำย้อม มีค่าความคงทนต่อการขจัด เพิ่มขึ้น ร้อยละ 34.32, 25.13, 16.19, 49.71 และ 38.61 ตามลำดับ ดังภาพที่ 26

ผลการศึกษาที่ได้สัมพันธ์กับการศึกษาของ Leksophee *et al.* (2004) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของกรดอะดีปิก, กรดฟูมาริก, Bis (4-fluoro-3-nitrophenyl) sulfone (BFNS) และ โซเดียมซิเตรตต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหม พบว่าผ้าไหมที่เติมโซเดียมซิเตรต มีค่าความคงทนต่อการขจัดสูงที่สุด เนื่องจากโซเดียมซิเตรต (trisodium citrate) มีหมู่ $-\text{COO}^-$ 3 หมู่ โดยจะถูกโปรโตเนต (protonated) เป็น $-\text{COOH}$ ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ได้เป็นกรดซิตริก ซึ่งมีหมู่ $-\text{COO}^-$ 3 หมู่ จึงทำให้โมเลกุลของโซเดียมซิเตรต และ amino acid side chain ในเส้นใยไหมเกิดพันธะใหม่/พันธะข้ามทดแทนพันธะที่ถูกทำลาย ส่งผลให้ความคงทนต่อการขจัดมีค่าสูงกว่าผ้าไหมที่ไม่ใช้สารสร้างพันธะข้ามและผ้าไหมที่ใช้สารสร้างพันธะข้ามชนิดอื่น

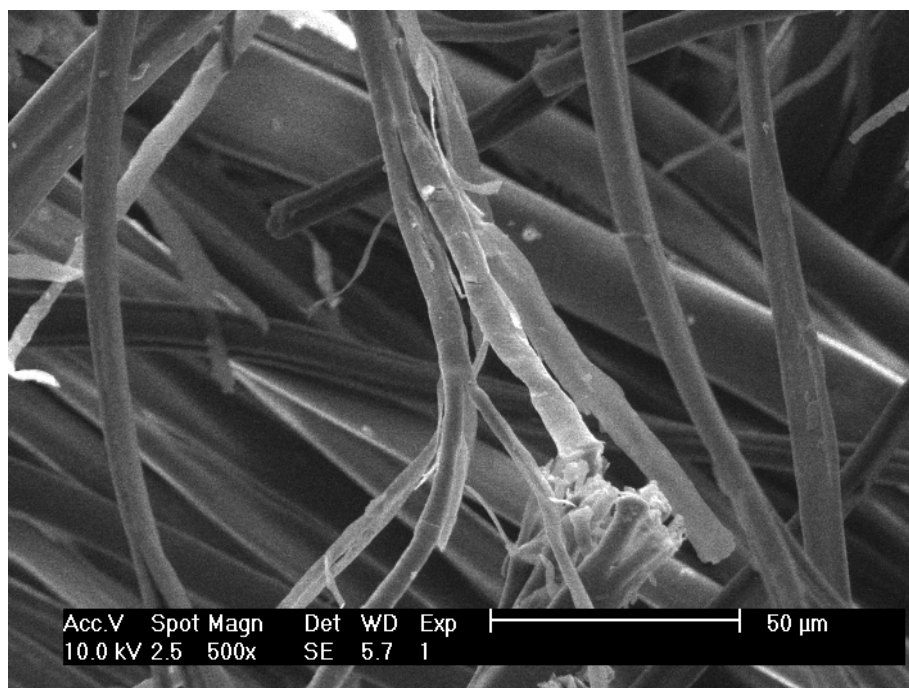


ภาพที่ 26 ค่าความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหมจากการย้อมสีและย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

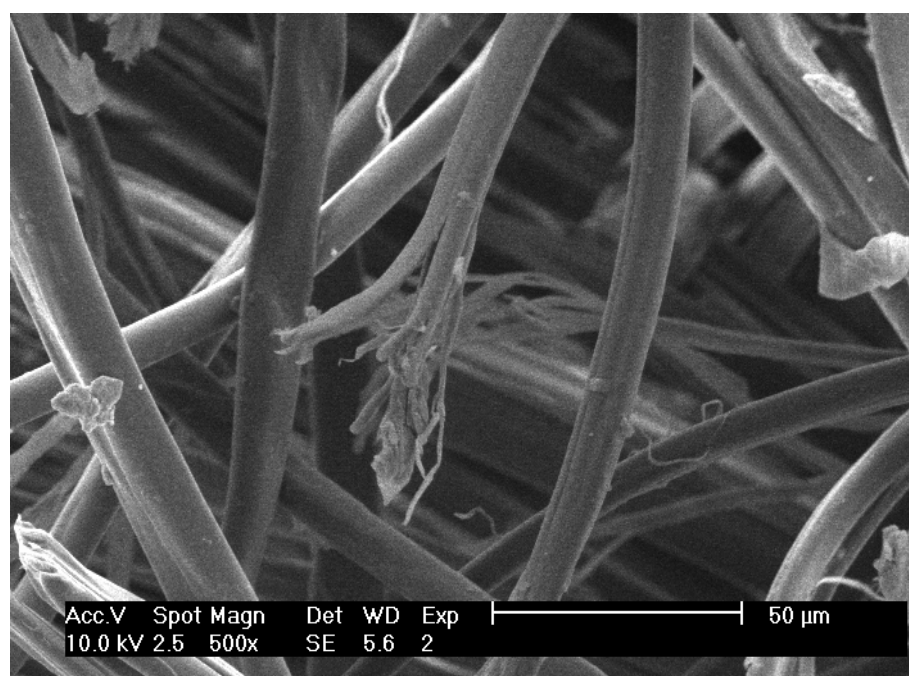
เมื่อ ■ = Untreated silk fabric ■ = Oxidative bleached silk fabric
□ = Silk with Dyes ▨ = Silk with Dyes and Buffer
และ ▩ = Silk with Dyes, Buffer and Citric acid

2.3 ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสี และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

ผลการศึกษาลักษณะการขาดของเส้นใยไหมหลังการทดสอบความคงทนต่อการขัดถูด้วยเครื่อง SEM พบว่า ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสี ดังภาพที่ 27 และลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม ดังภาพที่ 28 ซึ่งจะเห็นว่า ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่เติมกรดซิตริก ลักษณะการแตกของเส้นใยเกิดน้อยกว่าของในกลุ่มเส้นใยไหมที่ย้อมสีโดยไม่เติมกรดซิตริก ทั้งนี้อาจเนื่องจากการสร้างสารพันธะข้ามของกรดซิตริก เกิดพันธะระหว่างสายพอลิเพปไทด์ ทำให้เส้นใยไหมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั่นเอง



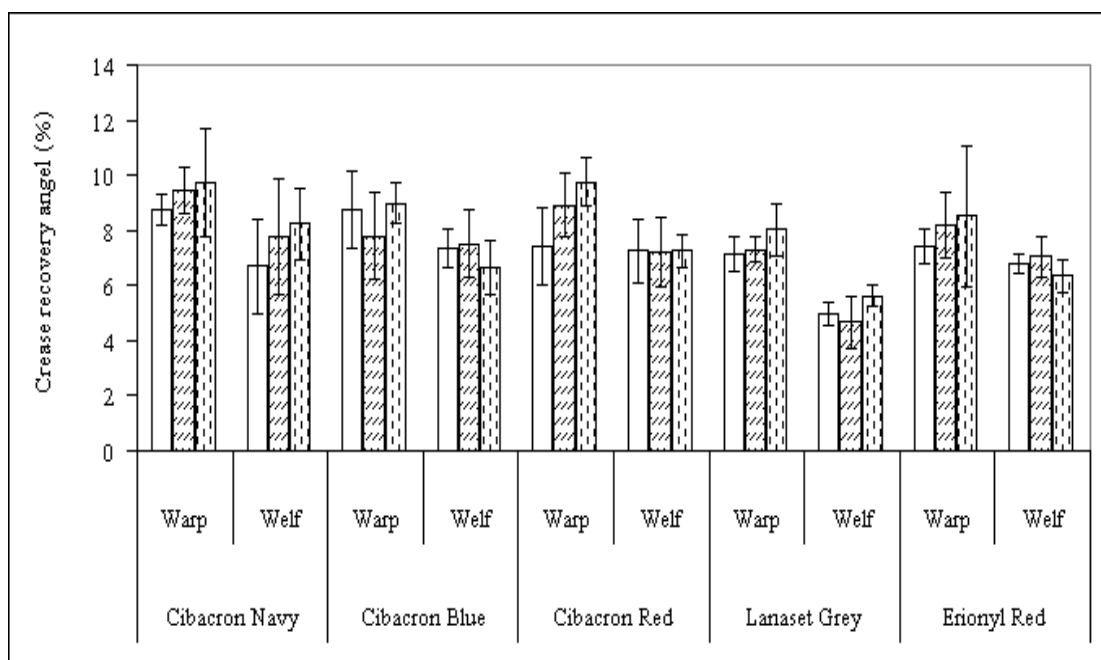
ภาพที่ 27 ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการเชื่อมสี หลังจากทดสอบความคงทนต่อการขัดถู



ภาพที่ 28 ลักษณะการขาดของเส้นใยไหมที่ผ่านการเชื่อมสีร่วมกับกรดซิตริก 3% o.w.f
หลังจากทดสอบความคงทนต่อการขัดถู

2.4 ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสี และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

ผลการศึกษา พบว่า ผ้าไหมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการฟอกขาว มีค่าความสามารถในการคืนตัวต่อการยับน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากทอไหมที่เคลือบเส้นใยไหม ทำให้ความสามารถในการคืนตัวเกิดได้ไม่ดี และรองลงมาคือผ้าที่ฟอกขาวแล้ว ทั้งนี้พบว่าผ้าไหมที่มีการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะจะมีความสามารถในการคืนตัวของผ้าไหมได้ดีขึ้น โดยสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionuy Red มีค่าความสามารถเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.33, 14.53, 16.90, 20.60 และ 23.25 ตามลำดับ **ดังภาพที่ 29** ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับค่าความคงทนต่อการซักของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสีร่วมกับกรดซิตริก ซึ่งใช้เป็นสารสร้างพันธะข้ามในการศึกษาครั้งนี้

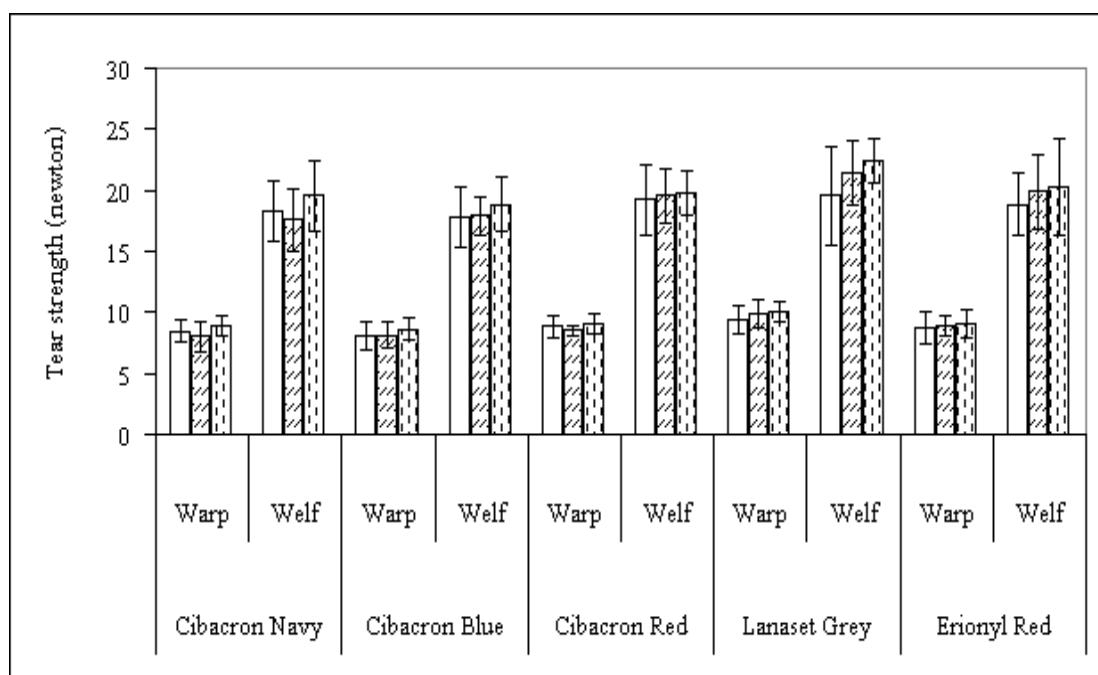


ภาพที่ 29 ค่าความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมจากการย้อมสีและการย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม เมื่อ

■ = Silk with dyes ▨ = Silk with dyes and buffer และ
 ▤ = Silk with dyes buffer and citric acid

2.5 ความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสี และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

การศึกษาความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหม พบว่า ผ้าไหมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมีใดๆ จะมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมากที่สุด หลังจากนั้นความแข็งแรงของผ้าไหมจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการฟอกขาว และกระบวนการย้อมสี ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของผ้าไหมที่ย้อมสี และย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม พบว่า สีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey มีความแข็งแรงไม่แตกต่างกันนัก แต่สำหรับสีย้อม Erionyl Red ความแข็งแรงของเส้นยืน และเส้นพุ่งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.54 และ 7.85 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ค่าความคงทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมจากการย้อมสี และการย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม เมื่อ

■ = Silk with dyes ▨ = Silk with dyes and buffer และ
 □ = Silk with dyes buffer and citric acid

2.6 ความคงทนของสีต่อการซักของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมสี และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักในกลุ่มสีรีแอคทีฟ พบว่า ผ้าไหมกลุ่มที่ย้อมสีโดยไม่เติมกรดซัลฟิวริกและอะซิเตดบัฟเฟอร์ มีค่าระดับความคงทนของสีสูงกว่า ผ้าไหมกลุ่มที่มีการเติมกรดซัลฟิวริกและกลุ่มที่มีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์ร่วมกับกรดซัลฟิวริก โดยสีย้อม Cibacron Navy มีค่าความคงทนของสีต่อการซักโดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับดีถึงดีมาก, ระดับดี และระดับดี ตามลำดับ สีย้อม Cibacron Blue มีค่าความคงทนของสีต่อการซักโดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับปานกลางถึงดี, ระดับปานกลาง และระดับปานกลาง ตามลำดับ และสีย้อม Cibacron Red มีค่าความคงทนของสีต่อการซักโดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับปานกลางถึงดี, ระดับดี และระดับดี ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (DE^*) ซึ่งเทียบกับสีของผ้าก่อนการซัก พบว่ามีค่าสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงสี คือ ผ้าที่มีความคงทนของสีต่อการซักระดับดี จะมีค่าความแตกต่างของสีน้อย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสีบนผ้าขาว โดยการศึกษาใช้ผ้าไหม พบว่าทุกกลุ่ม การเปลี่ยนของสีอยู่ในระดับดีมาก คือมีสีตกติดผ้าไหมน้อย

สำหรับกลุ่มสีแอซิด ซึ่งเป็นสีที่มีปัญหาในเรื่องความคงทนของสีต่อการซัก พบว่า ผ้าไหมกลุ่มที่ย้อมสีโดยไม่เติมกรดซัลฟิวริกและอะซิเตดบัฟเฟอร์ มีระดับความคงทนของสีต่อการซักน้อยกว่าสีที่มีการเติมกรดซัลฟิวริก และกรดซัลฟิวริกร่วมกับอะซิเตดบัฟเฟอร์ โดยสีย้อม Lanaset Grey มีค่าความคงทนโดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับดี, ระดับดี และระดับดีถึงดีมาก ตามลำดับ และสีย้อม Erionyl Red มีค่าความคงทนโดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับต่ำ, ระดับต่ำถึงปานกลาง และระดับปานกลาง ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของสี เช่นเดียวกับสีรีแอคทีฟ

กล่าวโดยสรุป พบว่าสารสร้างพันธะข้ามมีผลต่อค่าความคงทนของสีต่อการซัก ของสีย้อมแอซิดได้ดีกว่าสีย้อมรีแอคทีฟ ทั้งนี้อาจเนื่องจากสภาวะการย้อมสี ที่ pH 5.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการย้อมของสีย้อมแอซิด จึงทำให้การดูดซับสีย้อมดีกว่า ดังได้กล่าวในหัวข้อ 2.1 ประสิทธิภาพการติดสีผ้าไหมของสีย้อมแอซิดดีกว่าสีย้อมรีแอคทีฟ ทั้งนี้ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความคงทนของสีต่อการซักอีกด้วย ดังนั้นถ้าต้องการให้สีรีแอคทีฟมีความคงทนต่อการซัก ต้องย้อมสีที่สภาวะต่าง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมสีรีแอคทีฟ และเพื่อให้สามารถซึมเข้าสู่เส้นใยได้เร็ว (อัจฉราพร, 2527) ซึ่งผลการศึกษาความคงทนของสีต่อการซัก แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าความแตกต่างของสี (CIELAb Color Difference) ของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วย
สีรีแอคทีฟและสีแอสิด ร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม จากผลการทดสอบความคงทนของ
สีต่อการซัก

	Sample	Color Difference (DE*)	ระดับคุณภาพ	
			การเปลี่ยนแปลงสี	การเปื้อนสี
			(Color change)	บนผ้าขาว (ผ้าไหม) (Stain)
Cibacron Navy	B	0.73	4.5	5
	C	1.58	3.5-4.5	5
	D	1.59	3.5-4.5	5
Cibacron Blue	B	1.65	4-4.5	5
	C	2.54	3-3.5	5
	D	3.18	3-3.5	5
Cibacron Red	B	3.58	4-4.5	5
	C	0.56	3.5-4	5
	D	0.37	4	5
Lanaset Grey	B	2.11	3-4	4.5
	C	1.53	4-4.5	4.5
	D	1.01	4.5	4.5
Erionyl Red	B	7.28	2-2.5	3
	C	6.23	2-3	3
	D	5.06	2.5-3.5	3.5

หมายเหตุ B = Dye without citric acid C = Dye with acetate buffer pH 5.5

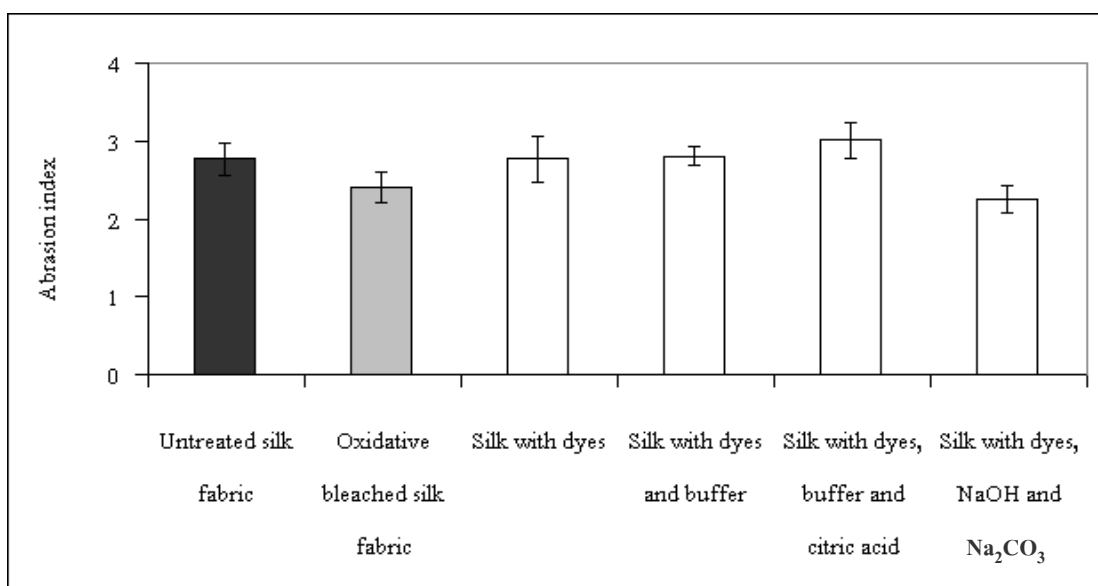
D = Dye with acetate buffer pH 5.5 and citric acid 3% o.w.f

3. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผ้าไหม ที่ย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ ที่สภาวะเป็นกรดและที่สภาวะเป็นด่าง

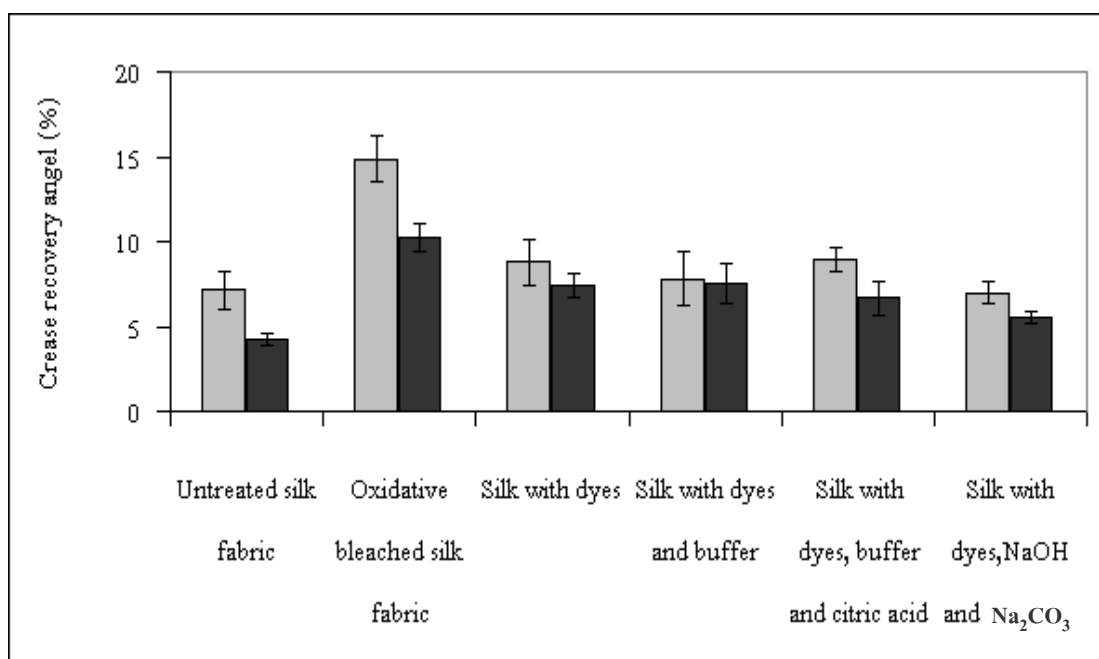
เนื่องจากการศึกษานี้ มีการศึกษาประสิทธิภาพการติดสีของสีรีแอคทีฟ และพบว่าสีรีแอคทีฟสามารถติดสีได้ แม้จะย้อมที่สภาวะกรด (pH 5.5) จึงมีการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของผ้าไหมที่สภาวะที่กรด และสภาวะด่าง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมสีรีแอคทีฟ โดยการเติม NaOH และ Na_2CO_3 ปริมาณ 30 กรัม และ 5 กรัม ตามลำดับ

ผลการศึกษาความคงทนต่อการขัดถู พบว่า การย้อมสีที่สภาวะด่าง มีค่าความคงทนต่อการขัดถูน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาว ทั้งนี้เนื่องจากผ้าไหมมีสมบัติที่ไม่ทนต่อสภาพด่าง และการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้ามมีค่าความคงทนต่อการขัดถูต่ำสุด (ภาพที่ 31)

สำหรับการศึกษาความสามารถในการคืนตัวต่อการยับ พบว่า ผ้าไหมที่ย้อมที่สภาวะด่าง มีความสามารถในการคืนตัวต่อการยับน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 6.25 ซึ่งน้อยกว่าผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาวมีค่า เท่ากับร้อยละ 6.27 เนื่องจากเส้นใยไหมมีสมบัติไม่ทนต่อสภาพด่าง ดังได้กล่าวในการทดสอบค่าความคงทนต่อการขัดถู ความแข็งแรงของเส้นใยไหมจึงลดลงนั่นเอง ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 32

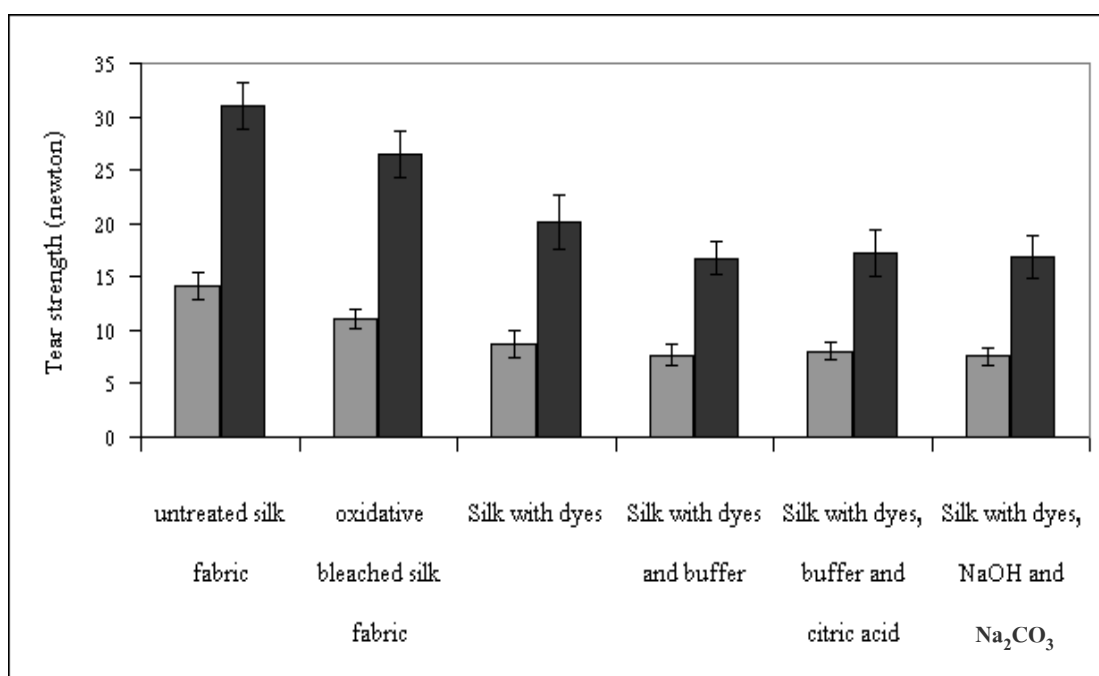


ภาพที่ 31 ค่าความคงทนต่อการขัดถูของผ้าไหมที่ย้อมสีที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง



ภาพที่ 32 เปอร์เซ็นต์การคืนตัวต่อการยับของผ้าไหมที่ย้อมสีที่สภาวะกรด (pH 5.5)

และที่สภาวะด่าง เมื่อ ■ = Warp และ ■ = Wef



ภาพที่ 33 ค่าความทนต่อแรงฉีกขาดของผ้าไหมที่ย้อมสีที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง

เมื่อ ■ = Warp และ ■ = Wef

สำหรับการทดสอบความคงทนต่อแรงกลึงขาด พบว่า ค่าความคงทนมีค่าไม่ต่างจากผ้าที่ย้อมที่สภาวะกรด โดยผ้าที่ย้อมที่สภาวะด่าง มีค่าความคงทนของเส้นพุ่ง และเส้นยืน เท่ากับ 7.56 และ 16.87 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ย้อมที่สภาวะกรด มีค่าเท่ากับ 8.74 และ 20.05 นิวตัน และเมื่อเทียบกับผ้าไหมที่ผ่านการฟอกขาว มีค่าความคงทน เท่ากับ 11.01 และ 26.50 นิวตัน ดังภาพที่ 33 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความคงทนมีค่าลดลง เมื่อผ่านกระบวนการความร้อน และการย้อมที่สภาวะด่าง เช่นเดียวกับการทดสอบค่าความคงทนต่อการขัดถู และความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของผ้าไหม

เมื่อมีการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก พบว่าผ้าไหมที่นำมาย้อมที่สภาวะด่างมีการเปลี่ยนแปลงของสี อยู่ในระดับดีถึงดีมาก คือมีการเปลี่ยนแปลงสีไม่มากนัก ซึ่งมีระดับการเปลี่ยนของสีดีกว่าผ้าไหมที่ย้อมในสภาวะกรดโดยเติมบัฟเฟอร์ และการย้อมสีร่วมกับบัฟเฟอร์และกรดซิตริก โดยมีระดับความคงทนระดับเดียวกับผ้าไหมที่ย้อมกับน้ำสี แต่เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี พบว่า ผ้าที่ย้อมที่สภาวะด่างมีค่าความแตกต่างน้อยกว่าผ้าไหมในน้ำย้อมสี คือ 1.33 และ 1.65 ตามลำดับ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ความแตกต่างของสี (CIELab Color Difference) ของผ้าไหมที่ผ่านการย้อมด้วยสี Cibacron Blue ที่สภาวะกรด (pH 5.5) และที่สภาวะด่าง จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

	Sample	Color Difference (DE*)	ระดับคุณภาพ	
			การเปลี่ยนแปลงสี	การเปลี่ยนสี
			(Color change)	บนผ้าขาว(ผ้าไหม)(Stain)
Cibacron Blue	B	1.65	4-4.5	5
	C	2.54	3-3.5	5
	D	3.18	3-3.5	5
	E	1.33	4-4.5	4.5

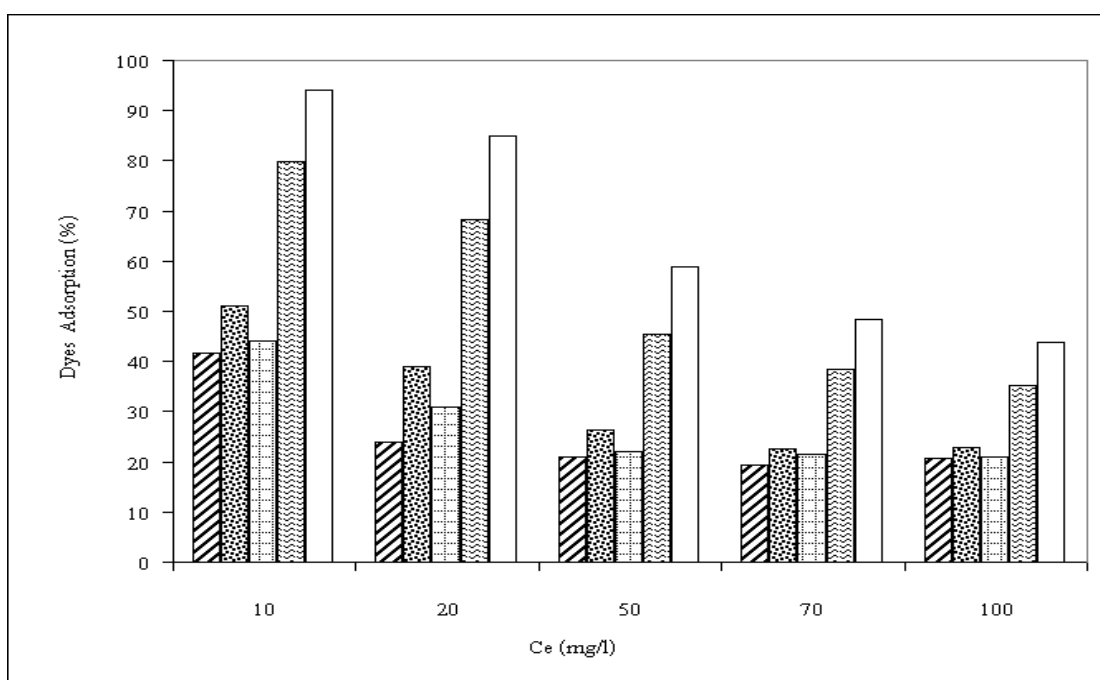
หมายเหตุ B = Dye without citric acid C = Dye with acetate buffer pH 5.5

D = Dye with acetate buffer pH 5.5 and citric acid 3% o.w.f

E = Silk with dyes, NaOH and Na₂CO₃

4. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red โดยถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red โดยถ่านกัมมันต์ พบว่าปริมาณสีย้อมที่เหลือเริ่มคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง แต่ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์แต่ละสีมีประสิทธิภาพแตกต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับสีย้อม Erionyl Red และ Lanaset Grey ตามลำดับ ในทุกความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ (ภาพที่ 34) และเมื่อนำความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่จุดสมดุล มาทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ 2 ชนิดคือ Freundlich isotherm และ Langmuir isotherm แสดงผลดังตารางที่ 11



ภาพที่ 34 ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ ที่จุดสมดุล

เมื่อ = Cibacron Navy = Cibacron Blue = Cibacron Red
 = Lanaset Grey = Erionyl Red

พจน์ย์ (2549) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีของสีย้อมสังเคราะห์ Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red และ Lanaset Grey ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 mg/l ด้วยวิธีเฉลี่ยจากก่อนเชื้อในการเพาะเห็ด ผลการศึกษาพบว่า สีนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีของ Lanaset Grey ได้สูงกว่าสีอื่นๆ ในทุกความเข้มข้นของสารละลายสีสังเคราะห์ โดยในการศึกษานี้ สารละลายสีสังเคราะห์มีค่าความเป็นกรดค่าที่ 4.0 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมของสีแอซิด ดังนั้นสีแอซิดจึงถูกดูดซับได้มากกว่าสีรีแอคทีฟทั้งสาม ซึ่งมีผลการศึกษาที่สอดคล้องกับการศึกษานี้

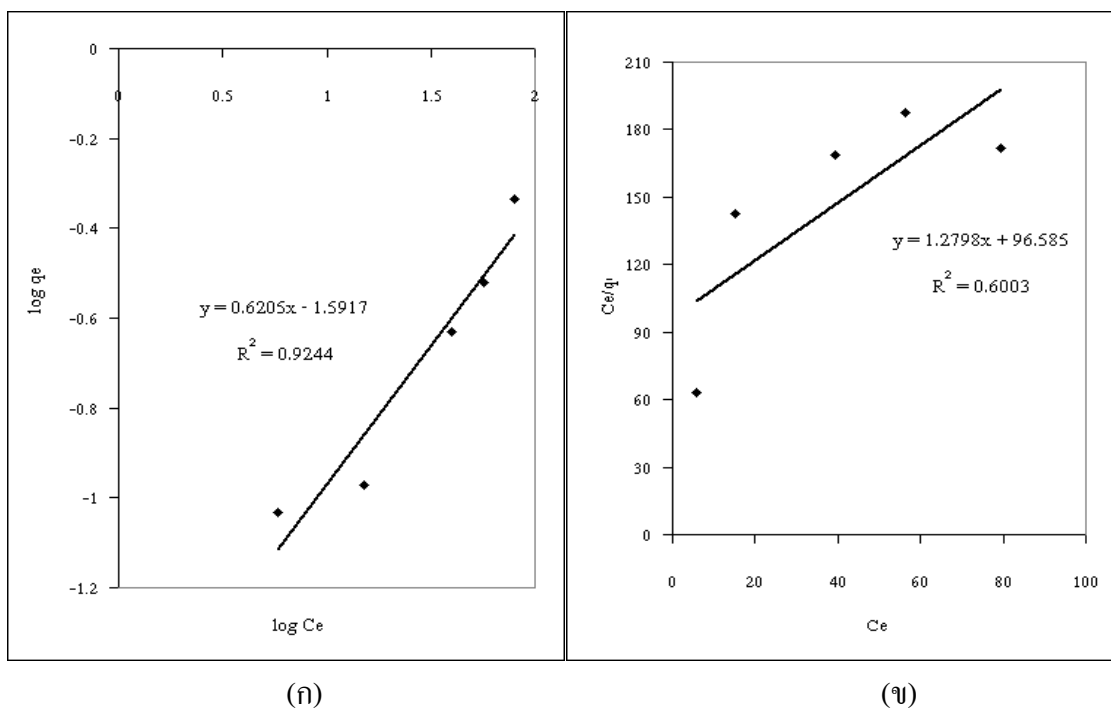
ตารางที่ 11 ค่าความชันและจุดตัดแกน y ของไอโซเทอมการดูดซับสีแบบ

Freundlich isotherm และ Langmuir isotherm โดยถ่านกัมมันต์

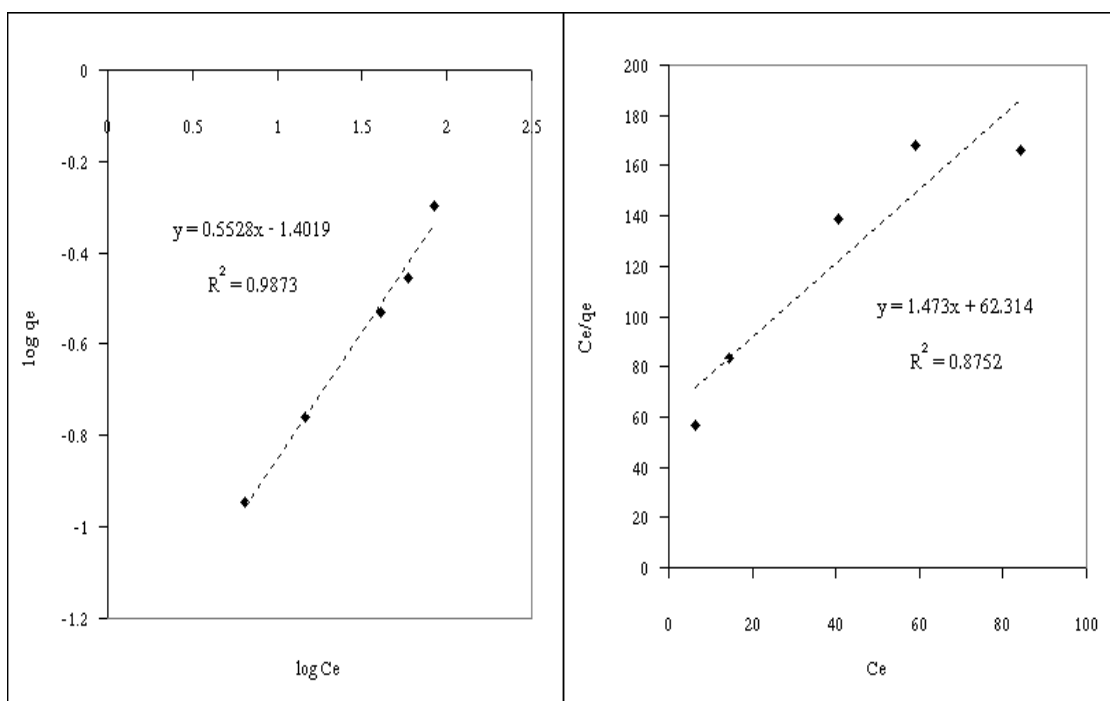
สีย้อม	Freundlich Isotherm			Langmuir Isotherm		
	ความชัน $1/n$	จุดตัดแกน Y (log K_F)	r^2	ความชัน K/q_0	จุดตัดแกน Y ($1/q_0$)	r^2
Cibacron Navy	0.6205	-1.5917	0.9244	1.2798	96.585	0.6003
Cibacron Blue	0.5528	-1.4019	0.9873	1.473	62.314	0.8752
Cibacron Red	0.5776	-1.4781	0.9715	1.468	73.185	0.7935
Lanaset Grey	0.4064	-0.8658	0.9932	1.1673	14.734	0.9502
Erionyl Red	0.3221	-0.443	0.9934	0.7048	4.2632	0.9594

ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (r^2) ของ Freundlich isotherm ของทุกสีย้อมมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าของ Langmuir isotherm (ตารางที่ 11) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มสอดคล้องกับการดูดซับของสมการ Freundlich มากกว่าของสมการ Langmuir (ภาพที่ 35 ถึง 39) นั่นแสดงว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมได้หลายชั้น ตามสมมติฐานของสมการ Freundlich นั่นเอง

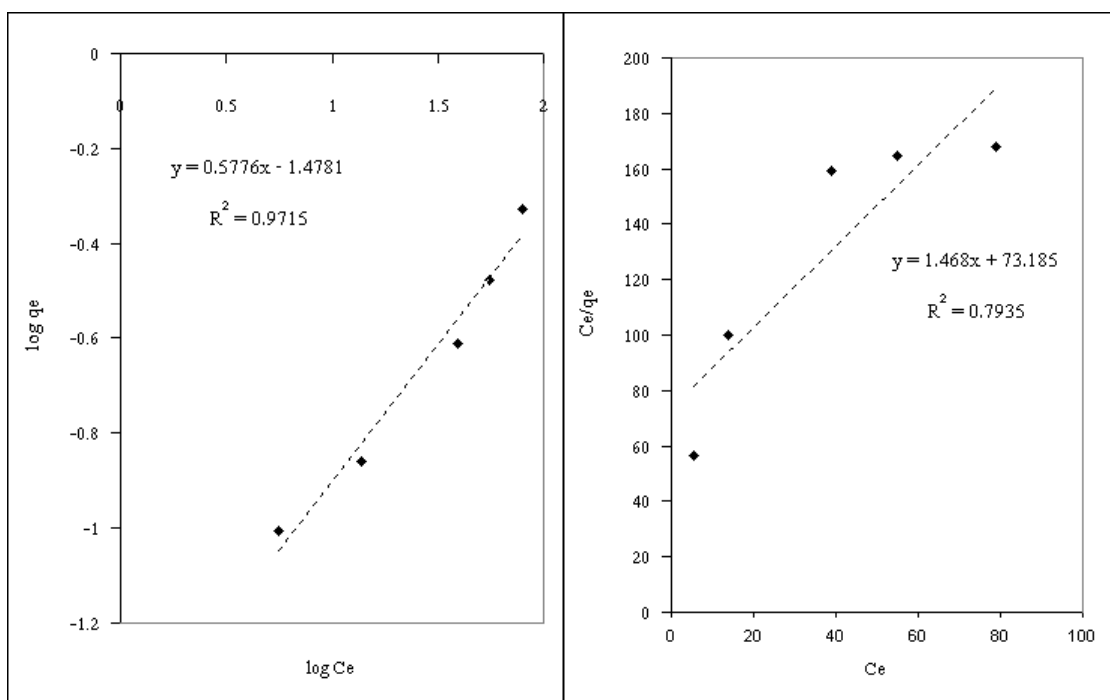
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ของสีย้อมแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากค่า n และ K_f พบว่าสีย้อม Erionyl Red และ Lanaset Grey ซึ่งเป็นสีย้อมกรด มีค่า K_f มากกว่าสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue และ Cibacron Red แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อม Erionyl Red และ Lanaset Grey ได้มากที่สุด และมีความเร็วในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์มากที่สุด (พิจารณาจากค่า n) สำหรับสีย้อม Cibacron Navy ซึ่งมีค่า K_f ต่ำที่สุด จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสีย้อมนี้ได้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่จุดสมดุล (ภาพที่ 35) ทั้งนี้การที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมได้แตกต่างกันนั้น เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม รวมถึงสถานะของน้ำสีย้อมที่ใช้ศึกษาด้วย



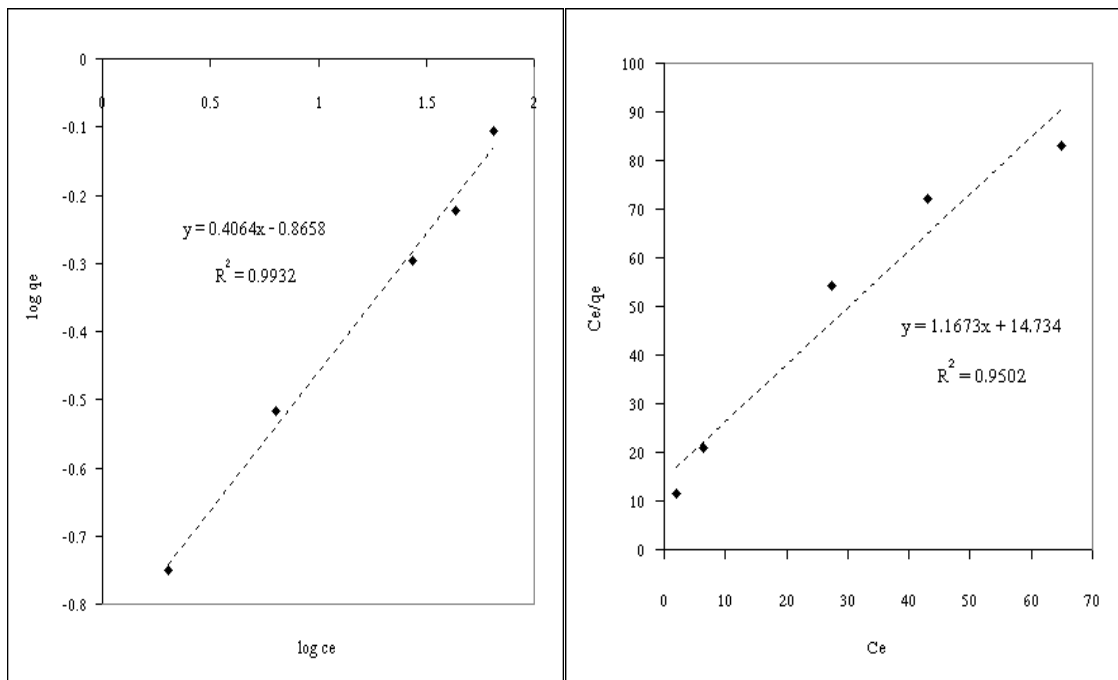
ภาพที่ 35 การดูดซับสีย้อม Cibacron Navy ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm และ (ข) Langmuir isotherm



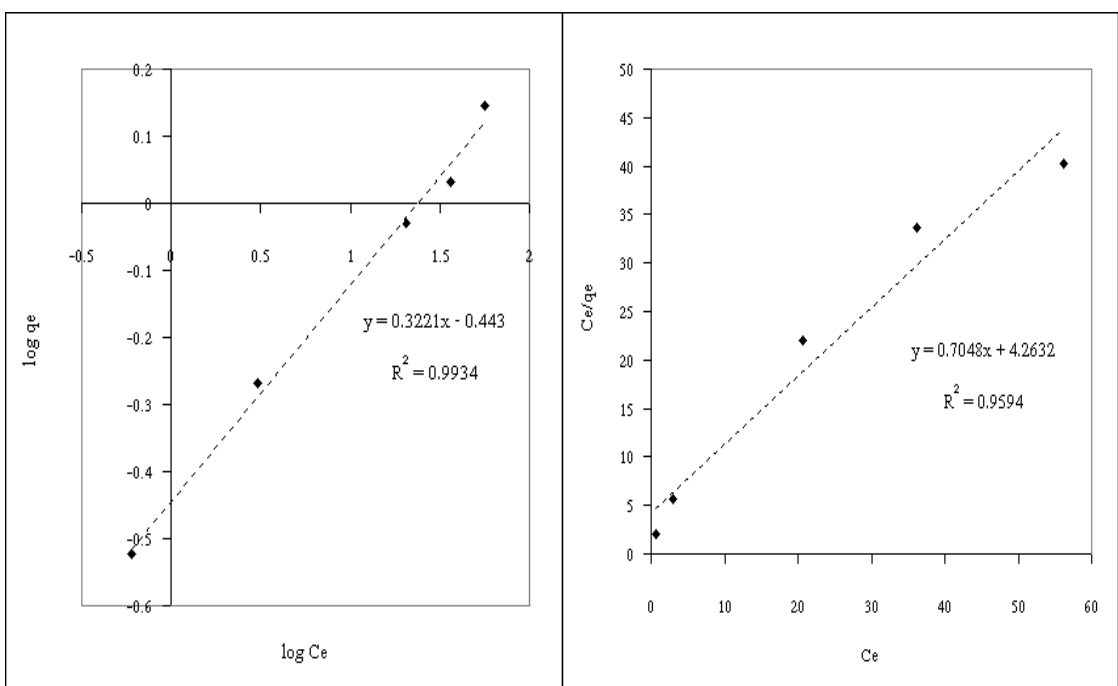
ภาพที่ 36 การดูดซับสีย้อม Cibacron Blue ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm และ
(ข) Langmuir isotherm



ภาพที่ 37 การดูดซับสีย้อม Cibacron Red ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm และ
(ข) Langmuir isotherm



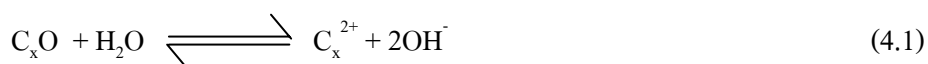
ภาพที่ 38 การดูดซับสีของ Lanaset Grey ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm และ
(ข) Langmuir isotherm



ภาพที่ 39 การดูดซับสีของ Erionyl Red ของถ่านกัมมันต์ (ก) Freundlich isotherm และ
(ข) Langmuir isotherm

โครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายนั้น ซึ่งโดยทั่วไปถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม อันเนื่องจากการออกซิไดส์คาร์บอน โดยการออกซิไดส์ที่อุณหภูมิต่ำ คาร์บอนที่ได้จะสามารถดูดซับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้ดี เรียกว่า คาร์บอนแบบแอล (L-type carbon) และการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง จะได้คาร์บอนแบบเอช (H-type carbon) ซึ่งสามารถดูดซับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ดี โดยแบ่งช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 500-600 องศาเซลเซียส คาร์บอนแบบแอลจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นตัวออกซิไดส์ที่สำคัญ ส่วนคาร์บอนแบบเอชจะใช้ตัวออกซิไดส์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) (Faust and Aly, 1987)

Huang and Wu (1977) ได้อธิบายสาเหตุที่ค่า pH เพิ่มขึ้นภายหลังการเติมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากผิวของถ่านกัมมันต์แบบเอช มีกลุ่มฟังก์ชันนอลที่อยู่ในรูปของ C_xO และ C_xO_2 เมื่อสัมผัสกับน้ำในสารละลายที่สภาวะเป็นกลางหรือที่สภาวะเป็นกรด กลุ่มฟังก์ชันนอลจะออกซิไดส์กับน้ำที่อยู่รอบถ่านกัมมันต์ ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2



หรือ



ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและกลุ่มฟังก์ชันนอลบนผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน เป็นผลให้ค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น

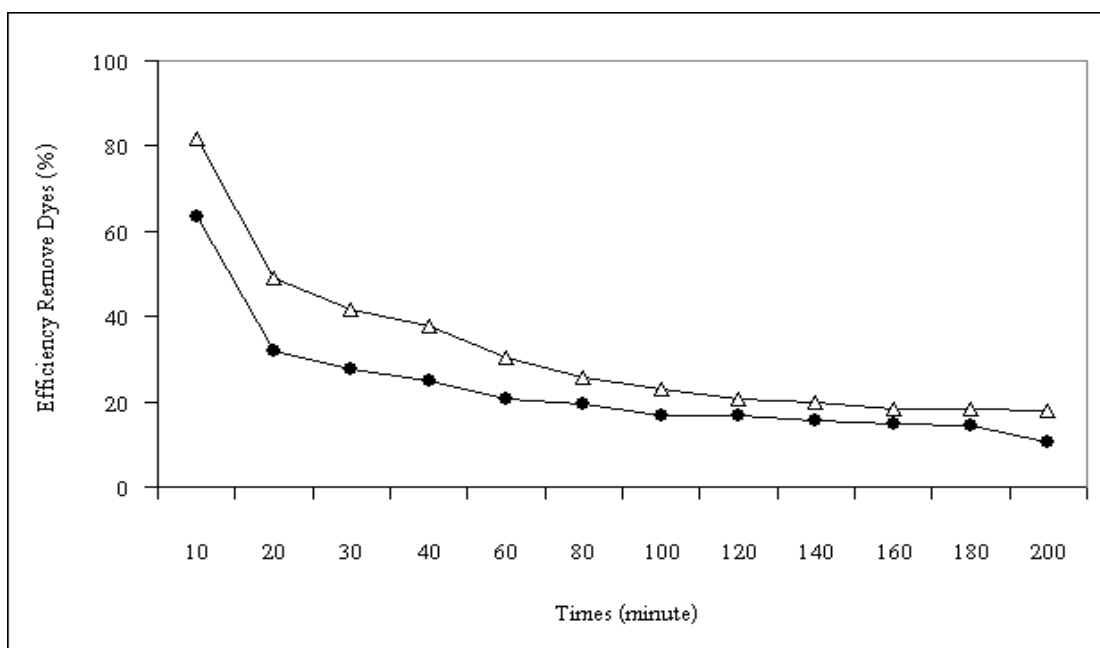
โดยในการศึกษาไอโซเทอมของสีย้อมทั้ง 5 ตัวอย่าง สีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red มีค่า pH เริ่มต้น คือ 6.91, 6.87, 6.85, 6.75 และ 6.79 ตามลำดับ และ ณ จุดสมดุลการดูดซับค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 7.30, 7.39, 7.39, 7.41 และ 7.46 ตามลำดับ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ศึกษา จึงเป็นถ่านกัมมันต์แบบเอช

5. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถ่านกัมมันต์

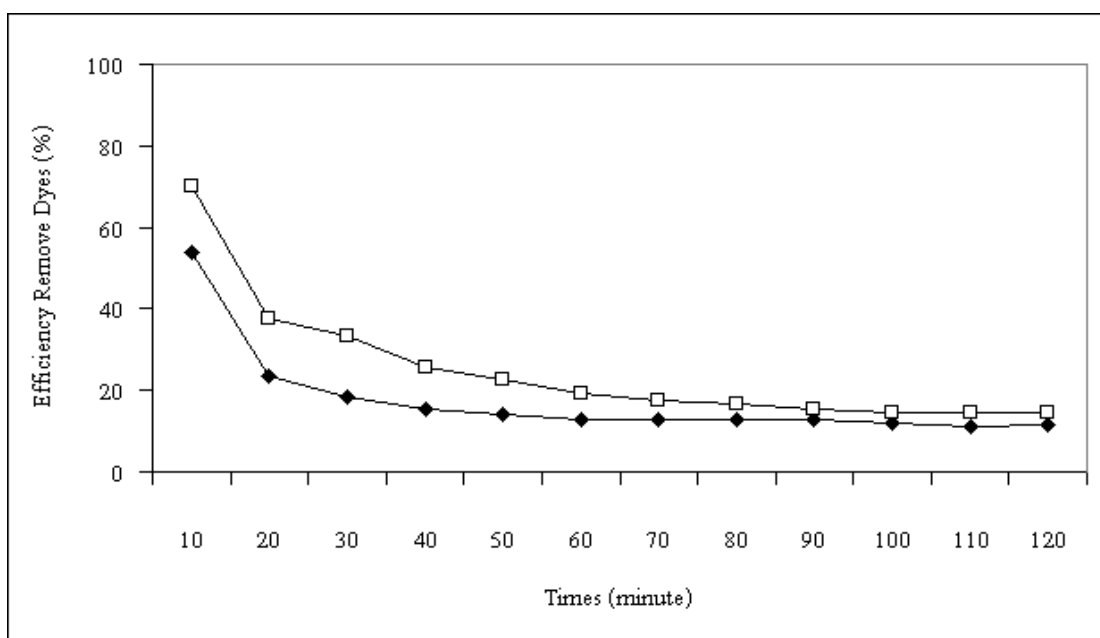
5.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมสีไหม

การศึกษาโดยใช้ถ่านกัมมันต์บรรจุในคอลัมน์เป็นตัวดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ซึ่งศึกษาที่อัตราการไหล 4.7 และ 7.3 ml/min เวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการศึกษาเท่ากับ 200 และ 120 นาที ตามลำดับ ในการวัดความเข้มข้น วัดที่ความยาวคลื่นมาตรฐาน คือ 620, 525, 436 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ของสีผสม เท่ากับ 548 นาโนเมตร

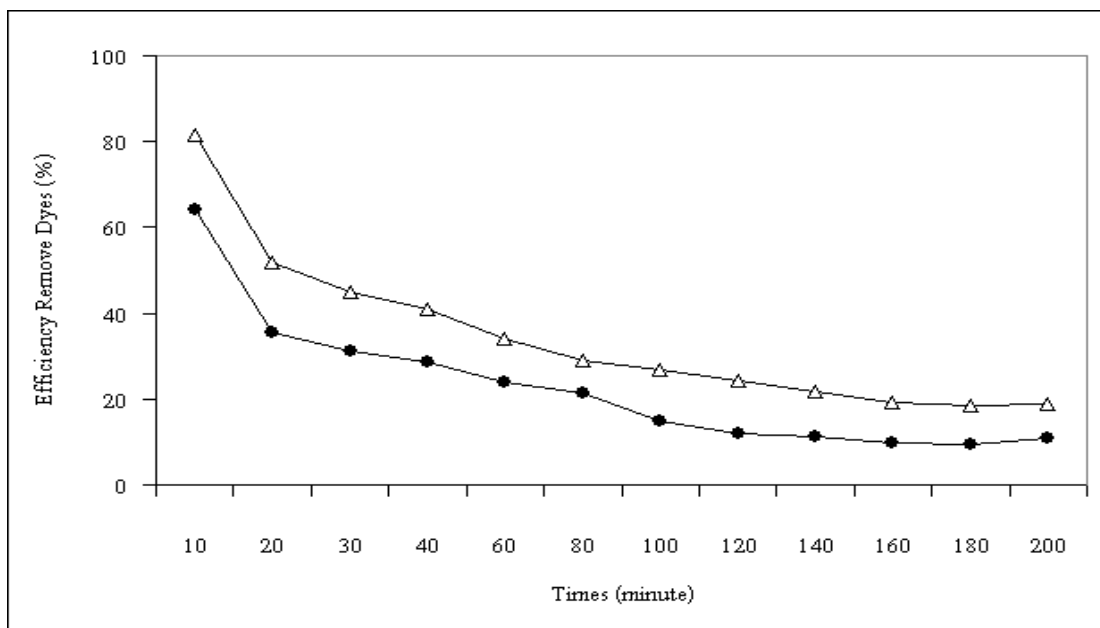
จากผลการศึกษา เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของน้ำเสียในทุกความยาวคลื่นและทุกอัตราการไหล จะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือ ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ สามารถลดความเข้มข้น ได้สูงสุดในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในที่สุด โดยที่อัตราการไหล 4.7 ml/min มีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าที่อัตราการไหล 7.3 ml/min เนื่องจากมีระยะเวลาที่ถ่านกัมมันต์สัมผัสกับน้ำเสียได้นานกว่า โดยคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการลดสีร้อยละ 60 และ 50 ตามลำดับ และคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 100 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการลดสีร้อยละ 80 และ 70 ตามลำดับ ดังภาพที่ 40- 47



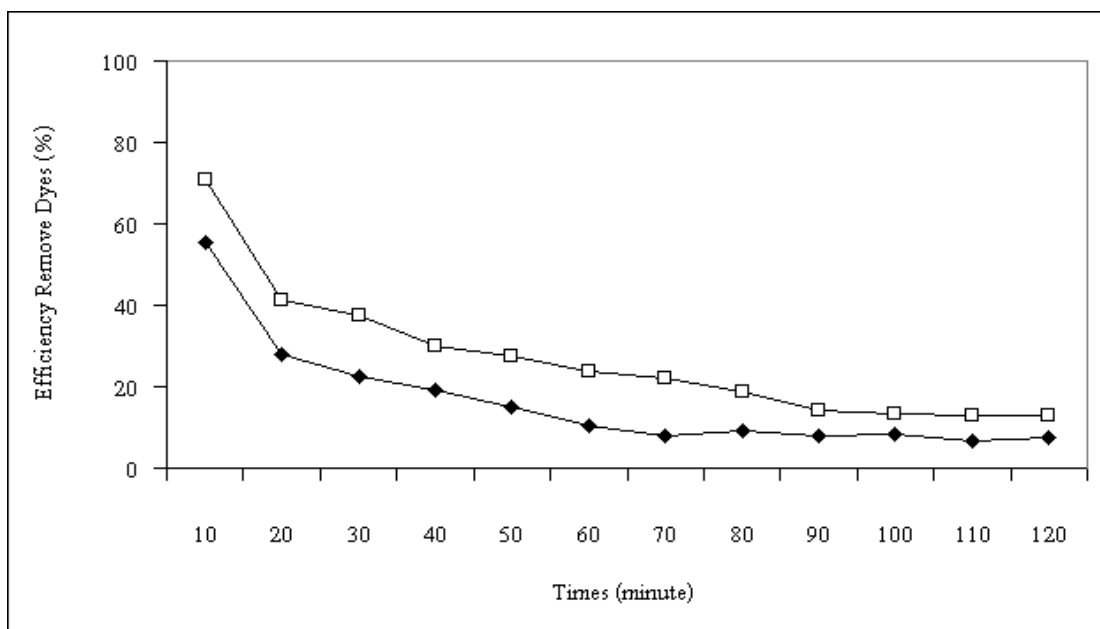
ภาพที่ 40 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.
เมื่อ ● = Activated carbon 50 cm. และ Δ = Activated carbon 100 cm.



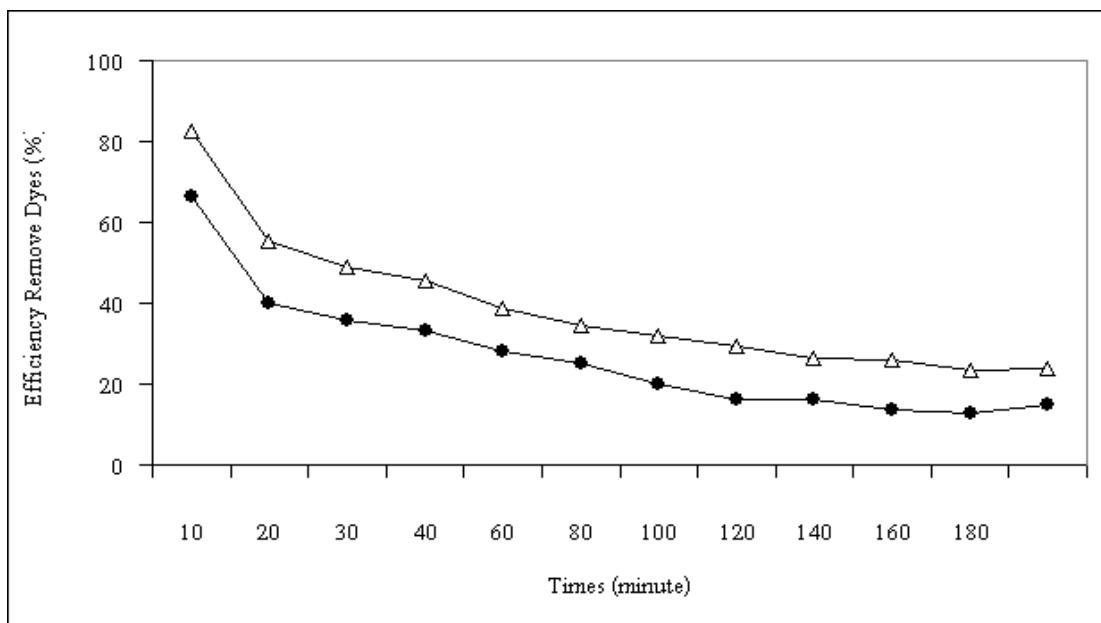
ภาพที่ 41 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min.
เมื่อ ◆ = Activated carbon 50 cm. และ □ = Activated carbon 100 cm.



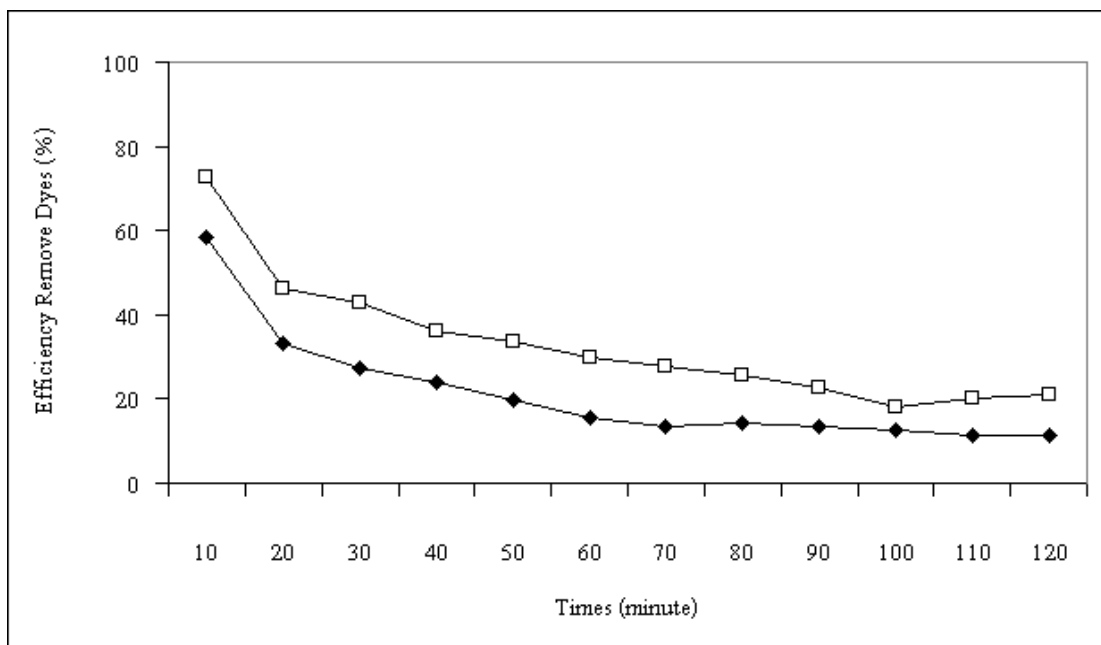
ภาพที่ 42 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร ($\lambda_{\max}$) ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.
เมื่อ * = Activated carbon 50 cm. และ Δ = Activated carbon 100 cm.



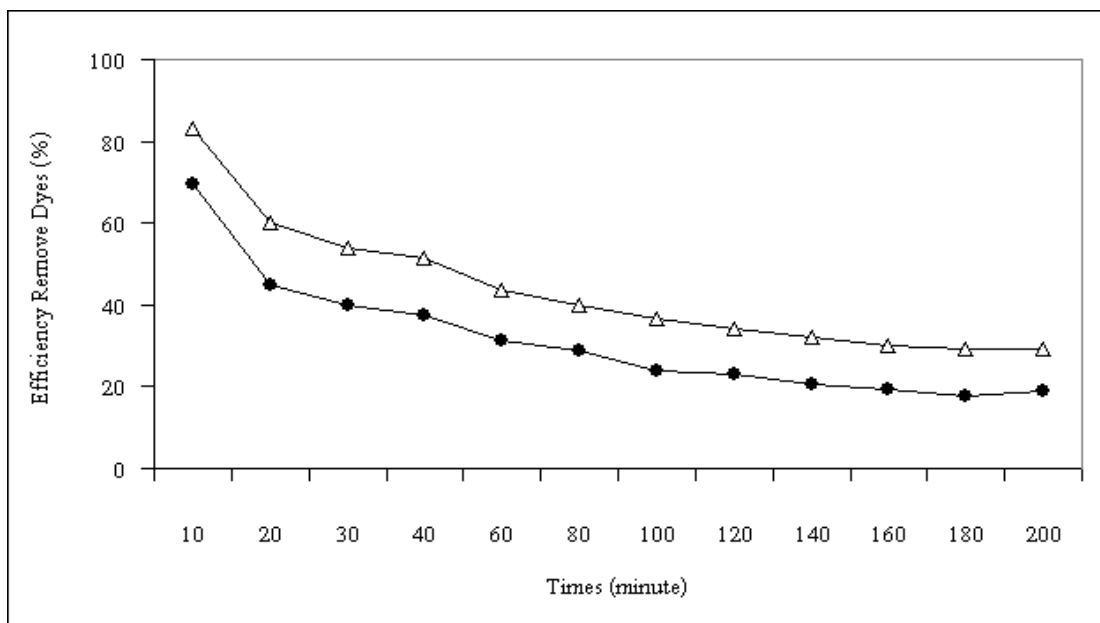
ภาพที่ 43 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาวคลื่น 548 นาโนเมตร ($\lambda_{\max}$) ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min.
เมื่อ $\diamond$ = Activated carbon 50 cm. และ $\square$ = Activated carbon 100 cm.



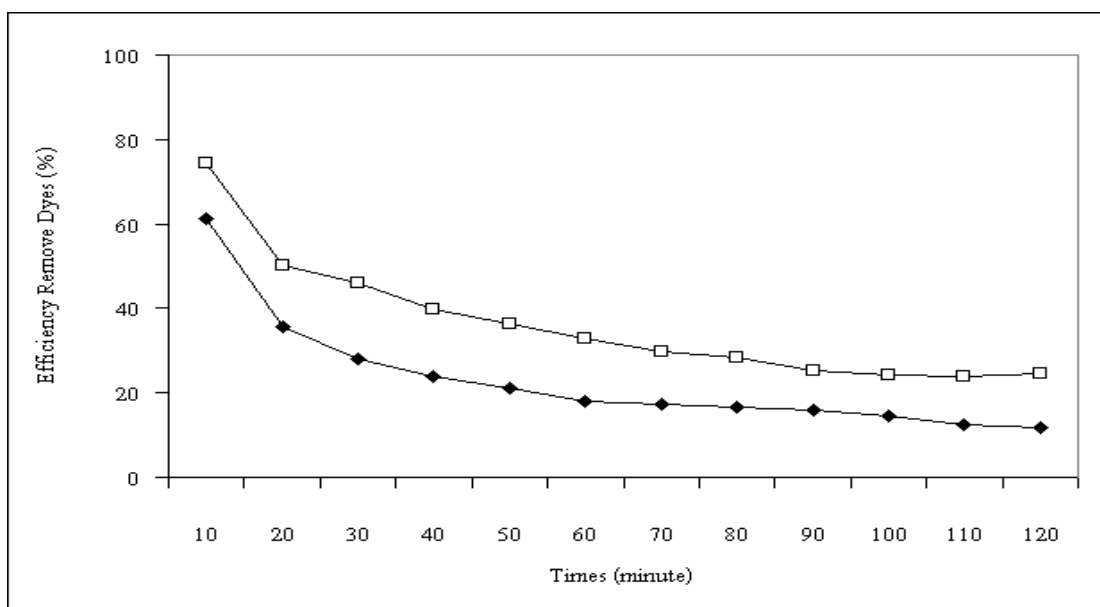
ภาพที่ 44 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.
เมื่อ * = Activated carbon 50 cm. และ Δ = Activated carbon 100 cm.



ภาพที่ 45 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min.
เมื่อ $\blacklozenge$ = Activated carbon 50 cm. และ $\square$ = Activated carbon 100 cm.



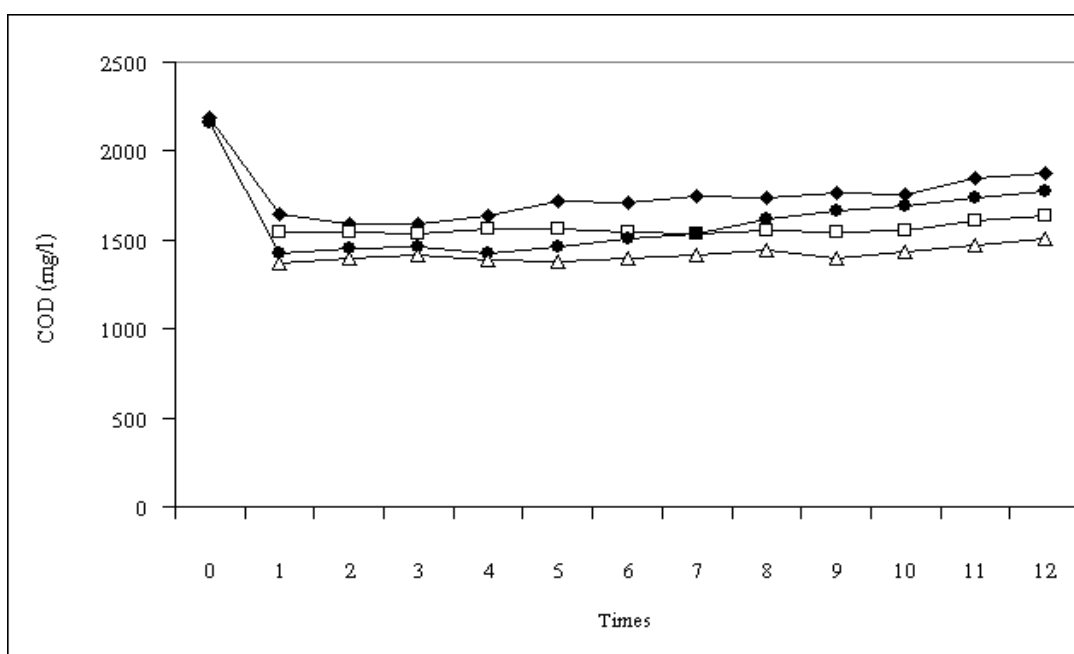
ภาพที่ 46 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 436 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min.
เมื่อ * = Activated carbon 50 cm. และ Δ = Activated carbon 100 cm.



ภาพที่ 47 ประสิทธิภาพการลดสีหลังจากไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่ความยาว คลื่น 436 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min.
เมื่อ $\diamond$ = Activated carbon 50 cm. และ $\square$ = Activated carbon 100 cm.

5.2 การศึกษาประสิทธิภาพการลด COD และค่าความเป็นกรดต่างในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมสีไหม

การศึกษาการประสิทธิการบำบัดน้ำเสีย ทำการศึกษาโดยให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ 2 คอลัมน์ต่อกัน โดยน้ำเสียไหลเข้าทางด้านบนและออกด้านล่างที่บรรจุถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1000 ml ที่อัตราการไหล 4.7 และ 7.3 ml/min ซึ่งที่อัตราการไหล 4.7 ml/min เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 10 นาที ในช่วง 40 นาทีแรก และเก็บทุก 20 นาทีจนครบเวลาที่ 200 นาที และอัตราการไหล 7.3 ml/min เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 10 นาที เป็นเวลา 120 นาที ผลการศึกษาพบว่าปริมาณ COD ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณลดลงสูงที่สุดในช่วง 10 นาทีแรก ในทุกกลุ่มการทดลอง หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจะค่อนข้างคงที่ ดังภาพที่ 48

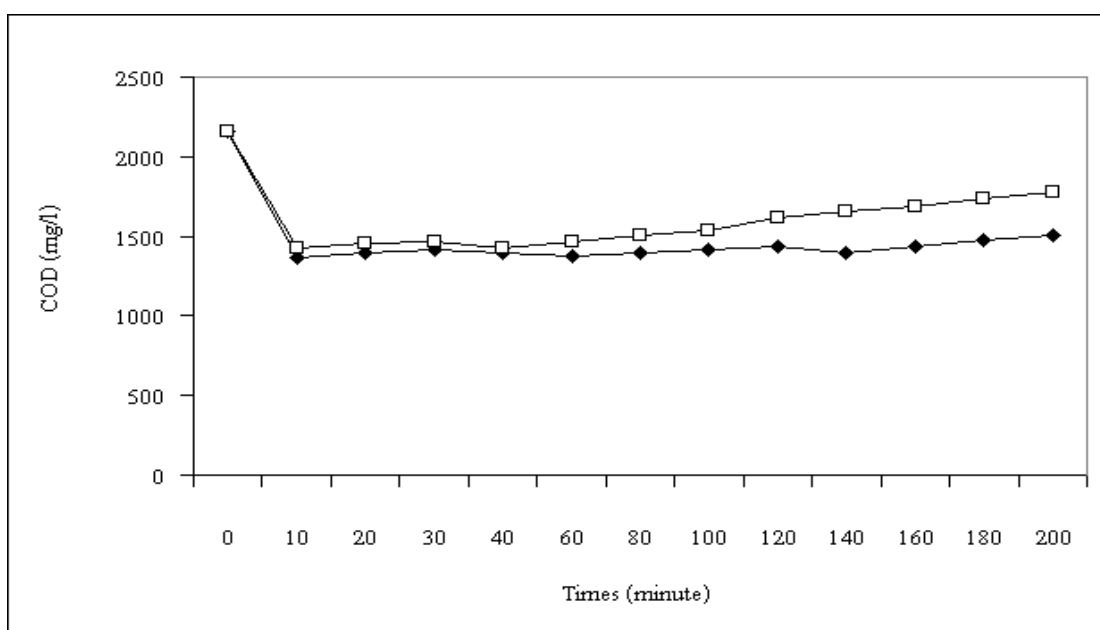


ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของน้ำย้อม ที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลและที่เวลาต่างๆ เมื่อ

- ◆ = 7.3 ml/min Activated carbon 50 cm. □ = 7.3 ml/min Activated carbon 100 cm.
 * = 4.7 ml/min Activated carbon 50 cm. △ = 4.7 ml/min Activated carbon 100 cm.

การศึกษาที่อัตราการไหล 4.7 ml/min พบว่าคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 100 และ 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ในช่วง 10 นาทีแรก โดยสามารถลดค่า COD ได้สูงสุด คือร้อยละ 36.63 และ 34.06 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะคงที่ โดยคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 50 เซนติเมตร ประสิทธิภาพเริ่มคงที่หลังจากนาที่ที่ 10 จนถึงนาที่ที่ 100 โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 32.10 หลังจากประสิทธิภาพลดลงอีกครั้งในนาที่ที่ 120 โดยช่วงนาที่ที่ 120 ถึงนาที่ที่ 200 มีประสิทธิภาพการบำบัด COD เฉลี่ยร้อยละ 21.57

สำหรับคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 100 เซนติเมตร ประสิทธิภาพการบำบัด COD หลังจากนาที่ที่ 10 จะเริ่มคงที่จนถึงนาที่ที่ 140 โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 35.19 และมีประสิทธิภาพลดลงในนาที่ที่ 160 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยในช่วงนาที่ที่ 160 ถึง นาที่ที่ 200 ร้อยละ 31.92 ทั้งนี้ที่ความสูงของถ่านกัมมันต์ 100 เซนติเมตร ทำให้มีระยะเวลาที่ถ่านกัมมันต์สัมผัสกับน้ำเสียได้นานกว่า ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลาที่ศึกษาจึงยังมีประสิทธิภาพดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีความสูง 50 เซนติเมตร ดังภาพที่ 49



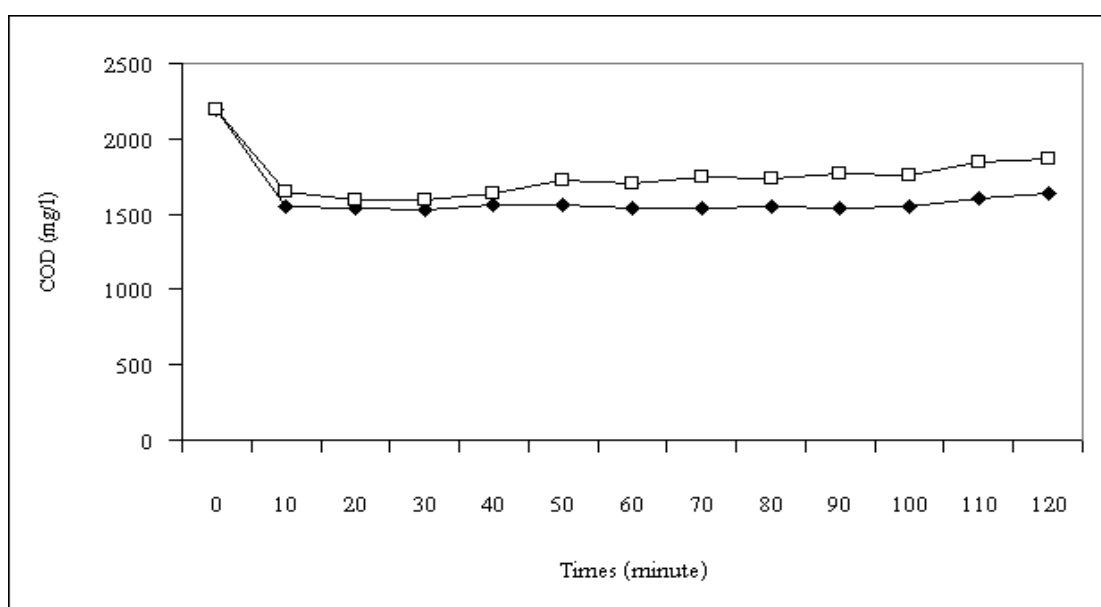
ภาพที่ 49 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของน้ำขี้หม เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์

สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min ณ เวลาต่างๆ

เมื่อ ◆ = Activated carbon 100 cm. และ □ = Activated carbon 50 cm.

สำหรับการศึกษาที่อัตราการไหล 7.3 ml/min ของคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 50 และ 100 เซนติเมตร พบว่าในช่วง 10 นาทีแรก ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 24.97 และ 29.34 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะเริ่มคงที่ โดยที่คอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 50 เซนติเมตร ประสิทธิภาพเริ่มคงที่หลังจากนาที่ที่ 10 จนถึงนาที่ที่ 40 โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 26.27 หลังจากคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 50 เซนติเมตร เริ่มมีประสิทธิผลลดลงหลังจากนาที่ที่ 40 โดยในช่วงนาที่ที่ 40 ถึงนาที่ที่ 110 มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ร้อยละ 20.64 และนาที่ที่ 110 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอีกครั้ง อยู่ที่ร้อยละ 15.21

สำหรับคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 100 เซนติเมตร ประสิทธิภาพการบำบัด COD หลังจากนาที่ที่ 10 จะเริ่มคงที่จนถึงนาที่ที่ 100 โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 29.36 และมีประสิทธิภาพลดลงในนาที่ที่ 110 ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยร้อยละ 26.05 ทั้งนี้ที่ความสูงของถ่านกัมมันต์ 100 เซนติเมตร ทำให้มีระยะเวลาที่ถ่านกัมมันต์สัมผัสกับน้ำเสียได้นานกว่า ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในช่วงเวลาที่ศึกษาจึงยังมีประสิทธิภาพดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีความสูง 50 เซนติเมตร ดังภาพที่ 50

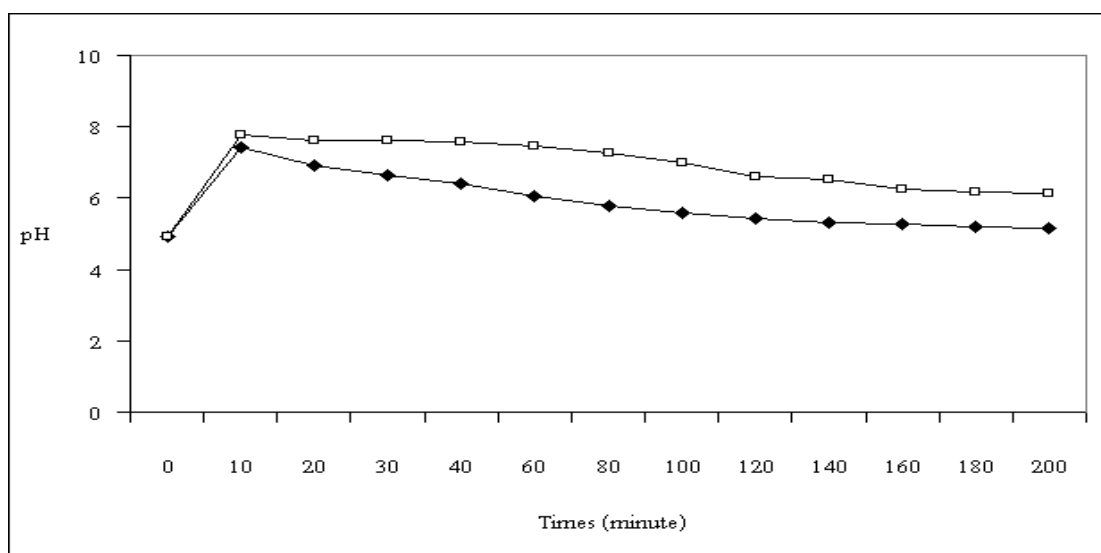


ภาพที่ 50 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ของน้ำข้อม เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 50 และ 100 เซนติเมตรที่อัตราการไหล 7.3 ml/min ณ เวลาต่างๆ
เมื่อ $\blacklozenge$ = Activated carbon 100 cm. และ $\square$ = Activated carbon 50 cm.

จากการศึกษาน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min. น้ำเสียก่อนเข้ามีค่า pH 4.92 หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 และ 100 เซนติเมตร ในช่วง 10 นาทีแรก ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 7.43 และ 7.77 ตามลำดับ หลังจากนั้น pH จะมีค่าลดลงจนถึงจุดสิ้นสุดการศึกษา (นาทีที่ 200) ค่า pH เท่ากับ 5.17 และ 6.13 ตามลำดับ ดังภาพที่ 51

สำหรับที่อัตราการไหล 7.3 ml/min. โดยน้ำเสียก่อนเข้ามีค่า pH 4.9 และเมื่อไหลผ่านถ่านกัมมันต์ในช่วง 10 นาทีแรก ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 7.23 และ 7.68 ตามลำดับ หลังจากนั้นค่า pH จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยค่า pH ที่เวลาสิ้นสุด เท่ากับ 5.08 และ 5.86 ตามลำดับ ดังภาพที่ 52

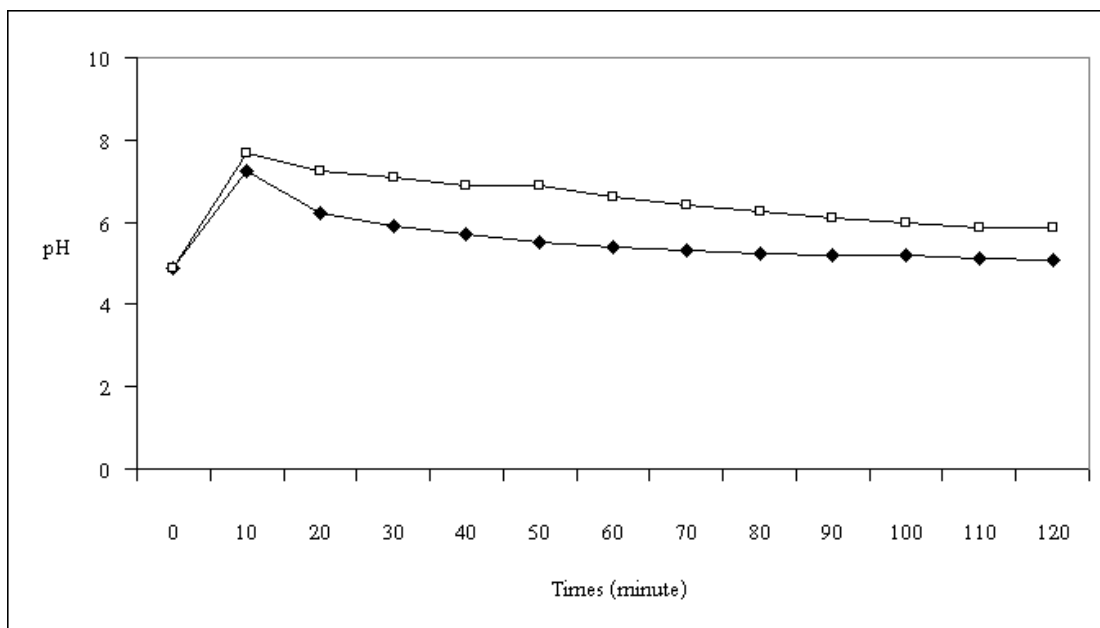
สำหรับค่า pH ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 10 นาทีแรก อาจเนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่นำมาศึกษาเป็นแบบเอช (ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4) ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำและกลุ่มฟังก์ชันนอลบนผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน (ดังสมการ 4.1 และ 4.2) ส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับประจุลบได้ลดลง และการเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มฟังก์ชันนอลบนผิวถ่านกัมมันต์ลดลง ค่า pH ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อเวลาผ่านไป จึงมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับนาทีที่ 10 ซึ่งมีค่า pH เพิ่มขึ้นสูงสุด



ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำขี้หม เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์

สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min ณ เวลาต่างๆ

เมื่อ $\blacklozenge$ = Activated carbon 50 cm. และ $\square$ = Activated carbon 100 cm.



ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำขี้อม เมื่อไหลผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์

สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 7.3 ml/min ณ เวลาต่างๆ

เมื่อ ◆ = Activated carbon 50 cm. และ □ = Activated carbon 100 cm.

5.3 การศึกษาประสิทธิภาพความสัมพัทธ์ในการลดปริมาณ COD และความเข้มข้นในน้ำเสียจากกระบวนการขี้อมสีใหม่

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณ COD (หัวข้อ 4.1) และการลดความเข้มข้น (หัวข้อ 4.2) พบว่า ประสิทธิภาพการลดปริมาณ COD และการลดความเข้มข้น ของถ่านกัมมันต์ ในช่วง 10 นาทีแรก ซึ่งเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด พบว่าประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นได้ประมาณร้อยละ 80 และประสิทธิภาพการลดปริมาณ COD ได้ประมาณร้อยละ 30 ดังนั้นจึงมีการศึกษาหาปริมาณ COD เพิ่มเติม เนื่องจากในน้ำเสียที่นำมาศึกษาประกอบด้วย น้ำสี กรดซิตริก และอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่ pH 5.5 ผลการศึกษาดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปริมาณ COD ของสารเคมี ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำเสีย

	สี 100 mg/L	citric acid	acetate buffer pH 5.5 0.2 M	citric acid+ acetate buffer	น้ำเสียที่ศึกษา
COD (mg/L)	81.25	298.33	3,500	3,608.33	2,176.39

จากตารางที่ 12 พบว่าปริมาณ COD ของอะซิเตตบัฟเฟอร์ มีค่าสูงสุด คือ 3,500 mg/L โดยเมื่อนำมาผสมกับกรดซิตริก มีค่า COD เท่ากับ 3,600 mg/L และปริมาณ COD ของน้ำสีความเข้มข้น 100 mg/L มีค่า COD เท่ากับ 80 mg/L ทั้งนี้ ค่า COD เป็นค่าที่บอกปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงเป็นตัวชี้วัดที่บอกความสกปรกของน้ำเสีย และบอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการลดปริมาณ COD ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า COD จะเห็นว่าปริมาณ COD ของน้ำเสียเกิดจาก สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์และกรดซิตริก ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ซึ่งเมื่อละลายน้ำ เกิดการแตกตัว ประกอบกับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ศึกษานี้เป็นถ่านกัมมันต์แบบเอช ซึ่งมีพื้นผิวที่เป็นประจุลบเป็นส่วนใหญ่ จึงไม่สามารถดูดซับ โมเลกุลของอะซิเตตและซิตริก ซึ่งมีประจุลบได้ ปริมาณ COD ที่ผ่านการบำบัดแล้วจึงยังมีค่าสูง

ในการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์นี้ จึงต้องมีการบำบัดร่วมโดยวิธีทางชีวภาพ เนื่องจากในน้ำเสีย นอกจากมีสีขุ่นเป็นองค์ประกอบแล้ว ยังมีสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ อะซิเตตบัฟเฟอร์และกรดซิตริกอยู่ นอกจากนี้ค่า COD ที่ผ่านการบำบัดแล้วยังมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งกำหนดให้มีค่า COD ไม่เกิน 400 mg/l (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพร่วมด้วย

สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์และการบำบัดน้ำเสีย แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีสังเคราะห์และลักษณะทางกายภาพของผ้าไหม ที่ผ่านการย้อมสีและการย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม และส่วนที่สอง คือ การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีไหมด้วยคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพของผ้าไหม เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าไหมตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางเคมี พบว่า การฟอกขาวผ้าไหมแบบออกซิเดทีฟ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ความขาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.11 และความสามารถในการคืนตัวต่อการยับของเส้นยืนและเส้นพุ่ง มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 51.87 และ 58.18 ตามลำดับ แต่ความคงทนต่อการซักด้อมีค่าลดลงร้อยละ 13.15 และความคงทนต่อแรงฉีกขาดของเส้นยืนและเส้นพุ่งมีค่าลดลงร้อยละ 22.37 และ 14.53 ตามลำดับ

2. การศึกษาน้ำย้อมสีที่สภาวะกรด pH 5.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการย้อมของสีรีแอคทีฟ พบว่าสีย้อม Cibacron Blue และ Cibacron Red มีเปอร์เซ็นต์การติดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเติมบัฟเฟอร์และกรดซิตริก จากร้อยละ 16.26 เป็น 85.28 และร้อยละ 52.50 เป็น 95.87 ตามลำดับ และ Cibacron Navy เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.48 เป็น 43.69 และสีแอซิดซึ่งเป็นการย้อมที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การติดสีเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งสีย้อม Lanaset Grey และ Erionyl Red โดยเพิ่มจากร้อยละ 90 เป็น 99 และจากร้อยละ 89 เป็น 98 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (DE*) ของทุกตัวอย่างสีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มผ้าไหมที่ไม่มีการเติมอะซิเตดบัฟเฟอร์และกรดซิตริกเช่นกัน

3. การย้อมสีผ้าไหมร่วมกับสารสร้างพันธะข้าม โดยเทียบกับผ้าไหมที่ไม่มีการเติมบัฟเฟอร์และกรดซิตริก พบว่า สีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red มีค่าความคงทนต่อการซักด้อมเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.31, 8.73, 0.63, 9.76 และ 7.64 ตามลำดับ ความสามารถในการคืนตัวต่อการยับมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.33, 14.53, 16.90, 20.60 และ 23.25 ตามลำดับ และความคงทนต่อแรงฉีกขาดของสีย้อม Erionyl Red ของเส้นยืนและเส้นพุ่งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.54 และ 7.85 ตามลำดับ ส่วนสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey มีค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างจากการย้อมด้วยสีโดยไม่ใช้สารสร้างพันธะ

4. ความคงทนของสีต่อการซักของผ้าที่ย้อมร่วมกับสารสร้างพันธะข้ามของสีในกลุ่มรีแอคทีฟ อยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และสีแอซิด Lanaset Grey ค่าความคงทนมีค่าเพิ่มขึ้นจากกลุ่มที่ไม่ได้เติมสารสร้างพันธะข้าม โดยอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก และสี Erionyl Red ซึ่งเป็นสีที่ปัญหาเรื่องสีตกพบว่ามีค่าความคงทนเพิ่มขึ้น จากระดับต่ำเป็นระดับปานกลางถึงปานกลางเกือบดี

5. การทดสอบการย้อมสีรีแอคทีฟ สีย้อม Cibacron Blue ที่สภาวะกรด pH 5.5 (สภาวะที่ศึกษา) เทียบกับสภาวะด่าง โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต พบว่าการย้อมสีร่วมกับสารสร้างพันธะข้ามให้ลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่าการย้อมสีที่สภาวะด่าง ทั้งความคงทนต่อการขัดถู ความคงทนต่อการซัก และความสามารถในการคืนตัวต่อการย้อม สำหรับความคงทนของสีต่อการซัก พบว่าการย้อมที่สภาวะด่างให้ค่าความคงทนดีกว่าคืออยู่ระดับ ดีถึงดีมาก ส่วนการย้อมที่สภาวะกรดให้ค่าความคงทนอยู่ในระดับปานกลางถึงดี

6. การศึกษาการดูดซับสีย้อม Cibacron Navy, Cibacron Blue, Cibacron Red, Lanaset Grey และ Erionyl Red พบว่าปริมาณสีย้อมที่เริ่มคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง โดยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับสีย้อม Erionyl Red และ Lanaset Grey ตามลำดับ เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมสีแอซิด ทำให้สีทั้งสองถูกดูดซับได้มากกว่าสีรีแอคทีฟ (Cibacron Navy, Cibacron Blue และ Cibacron Red) และการดูดซับสีย้อมมีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm

7. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีใหม่ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สูง 50 และ 100 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 4.7 ml/min พบว่าคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 100 และ 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ในช่วง 10 นาทีแรก โดยสามารถลดค่า COD ได้สูงสุด คือร้อยละ 36.63 และ 34.06 ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 7.3 ml/min สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 24.97 และ 29.34 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงและเริ่มคงที่ สำหรับประสิทธิภาพการลดสีของถ่านกัมมันต์ สามารถลดความเข้มข้นได้สูงสุดในช่วง 10 นาทีแรกเช่นกัน โดยที่อัตราการไหล 4.7 ml/min มีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าที่อัตราการไหล 7.3 ml/min เนื่องจากมีระยะเวลาที่ถ่านกัมมันต์สัมผัสกับน้ำเสียได้นานกว่า โดยคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการลดสีได้ร้อยละ 60 และ 50 ตามลำดับ และคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ 100 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการลดสีได้ร้อยละ 80 และ 70 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในที่สุด

8. น้ำเสียที่นำมาศึกษาประกอบด้วย น้ำสี กรดซिटริก และอะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 5.5 โดยปริมาณ COD ของสารแต่ละตัว เป็นดังนี้ อะซิเตดบัฟเฟอร์ มีค่า COD สูงสุด คือ 3,500 mg/L และเมื่อนำมาผสมกับกรดซिटริก มีค่า COD เท่ากับ 3,600 mg/L สำหรับปริมาณ COD ของน้ำสีความเข้มข้น 100 mg/L ค่า COD เท่ากับ 80 mg/L นั้นแสดงว่าปริมาณ COD ของน้ำเสียนี้เกิดจากสารละลายอะซิเตดบัฟเฟอร์และกรดซिटริก ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ประกอบกับปริมาณ COD ของน้ำที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ยังมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งกำหนดให้มีค่า COD ไม่เกิน 400 mg/l จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพร่วมด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมถึงการฟื้นคืนสภาพ (regeneration) ของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีไหม รวมถึงการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้วิธีหรือสารที่หาได้ง่าย ราคาถูก มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสี
3. ศึกษาความหาสารเพื่อสร้างพันธะข้าม เพื่อลดปัญหาสีตกของผ้าไหมและปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผ้าไหม

เอกสารและอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราบำบัดน้ำเสีย. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ.
- กาวิ ศรีกุลกิจ. 2002. หลักการย้อมสีสิ่งทอ. *Colorway*. 7(41): 59-62 .
- กลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ (เคมีสิ่งทอ) ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ. 2543. การย้อมสีวัสดุสิ่งทอ. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.
- เจริญศรี เบญจมาลา. 2541. ผลของสารช่วยติดสีที่มีต่อการย้อมไหมด้วยเปลือกมะพร้าวอ่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คุณฉวี สุนทรารุณ. 2536. การออกแบบลายพิมพ์ผ้า. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ชนิตา เสมรัตน์. 2543. ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดซับผิวโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยงค์ ตำราญถิ่น. 2529. มาปลูกต้นไม้ย้อมสีไหมกันเถอะ. โคราซออฟเซ็ทการพิมพ์, นครราชสีมา.
- ทองดี เล็กโสภี, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และสุพิชฌา สุพรรณสมบูรณ์. 2545. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของผ้าไหมไทย. รายงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่1. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. 2544. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อม โดยการดูดซับด้วยซิลิกาอะลูมิเนียมที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นนทลี ชินวงศ์อมร. 2543. จลนพลศาสตร์และผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย้อมสีไหมด้วยสีครั่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นวลแข ปาลิวนิช. 2536. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย. ฟันนี่พับลิชชิ่ง, กทม.

นฤมล ศราษพันธุ์. 2533. การใช้สารช่วยติดในการย้อมไหมด้วยมันชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิรนาม. 2003. Color Chemistry. **Colorway**. 8(45): 21-24.

นันทยา ขานุมาศ. 2537. ความเป็นพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. **Colorway**. 1(6): 27-41.

บุษรา สร้อยระย้า. 2531. ผลของสารฟอกขาวโซเดียมไฮโปคลอไรท์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสีและความเหนียวของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัญญา เศรษฐา. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยใช้ถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิลันธุ์ ธรรมมงคล และสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. 2543. สรุปผลการศึกษาไหมไทยครบวงจร. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, กรุงเทพฯ.

โมโตอิ มินะกาวะ, เออิจิ คาวาริ และเจ็มซัย เหมะจันทร. 2530. วิทยาการไหม เล่ม 1. คณะกรรมการส่งเสริมสินค้าไหมไทย กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

มันสิน ดันทุลเวศม์. 2536. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ลัดดา แสงสุวรรณถาวร. 2545. การกำจัดสีรีแอคทีฟเอลโล 17 และสีรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วูธนันท์ ศิริพงศ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2003. ความรู้พื้นฐานเส้นใยสิ่งทอ. *Colorway*. 8(45): 13-17.

———. 2543. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

———. 2544. อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศิริอุมา บำรุงวงศ์. 2541. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมสิ่งทอด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

———. 2541. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมสิ่งทอด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
อ้างถึง Glosh, M.M., F.E. Woodard, O.J. Sproul, P.B. Knowlton and P.D. Gvertin. 1978. *Treatability studies and design considerations for textile wastewater*. *Water and Waste Eng.* 15(4): 35-41.

ศิริพรรณ พันพา. 2544. ประสิทธิภาพการลดสีและ COD ในน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สกวรัตน์ หิรัญกิจมงคล. 2543. จลนพลศาสตร์และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย้อมสีเส้นไหมด้วยสีธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถานีทดลองหม่อนไหมพุทไธสง สถาบันวิจัยหม่อนไหม. ม.ป.ป. การฟอกและย้อมสีไหม. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สมชาย เอกธรรมฤทธิ์. 2514. การกำจัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมด้วยวิธีการทางเคมี. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2542.
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสี. ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, กรุงเทพฯ.

สุทธิลา สวนาพร. 2535. ผลของสารช่วยติดสีจากธรรมชาติในการย้อมด้วยขมิ้นชัน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุจินต์ เอี่ยมปี. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับ
ด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัจฉราพร ไสลด. 2527. คู่มือการย้อมสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์อักษรบัณฑิต, กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA and WEF. 1998. **Standard Method for the Examination of Water and
Wastewater**. 20th ed. APHA Inc., New York.

Clark, R.M. and B.W. Lykins, Jr. 1989. **Granular Activated Carbon Design Operation and
Cost**. Michigan Lewins Pub, Michigan.

Corbman, B.P. 1975. **Textiles Fiber to Fabric** 5,th ed. McGraw-Hill, USA.

Chereisinoff, P.N. and A.C. Morresi. 1978. Carbon processes for the treatment of Cr (VI)-
containing industrial wastewater. **Water Sci. Technol.** 13: 629-650.

Donald, W.S. and H.E. Klei. 1979. **Wastewater Treatment**. Prentice-Hall, Inc. USA.

Eckenfelder, W.W. 1980. **Principles of Water Quality Management**. CBI Publishing Co., Inc.
Boston.

- . 2002. **Industrial Water Pollution Control**. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc., New York.
- Faust, S.D. and O.M. Aly. 1987. **Adsorption Process for Water Treatment**. Butterworth publ., Boston.
- Grosh P. and D. Das. 2000. **Modification of cotton by acrylic acid (AA) in the presence of NaH_2PO_4 and $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ as catalyst under thermal treatment**. Eur. Polymer J. Available: www.sciencedirect.com/htm, May 1, 2005.
- Hashem, M., R. Refaie and A. Hebeish. 2004. **Crosslinking of partially carboxymethylated cotton fabric via cationization**. Cleaner Prod. Available Source: <http://www.sciencedirect.com/htm>, October 5, 2005.
- Horrocks, A.R. and S.C. Anand 2000. **Handbook of Technical Textiles**. 1st ed. Woodhead Pubsh with The Textile Institute, England.
- Huang, C.P. and M.H. Wu. 1977. The removal of chromium(VI) from dilute aqueous solution by activated carbon. **Water Res.** 11: 673-679.
- Inoue, S. , K. Tanaka, H. Tnaka, K. Ohtomo, T. Kanda, M. Imamura, G. Quan, K. Kojima, T. Yamashita, T. Nakajima, H. Taira, T. Tamura and S. Mizuno. 2004. Assembly of the silk fibroin elementary unit in endoplasmic reticulum and a role of L-chain for protection of α 1, 2-mannose residues in N-linked oligosaccharide chain of fhexa/P25. **Eur. J. Biochem.** 271: 356-366.
- Karmakar, S.R. 1999. **Chemical Technology in The Pre-treatment Process of Textiles**. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Lacasse, K and I.W. Baumann. 2004. **Textile Chemicals: Environmental Data and Facts**.

Springer-Verlag, Berlin.

Leksophee, T., S. Supansomboon and N. Sombatsompop. 2004. Effects of crosslinking agents, dyeing temperature and pH on mechanical performance and whiteness of silk fabric. **J. Appl. Polymer Science** 91(2): 1000-1007.

Lickfield, G.C., C. Q. Yang, Z. Moa and W. Chen. 2000. **Investigation of flexible crosslinking systems for the retention of mechanical strength and abrasion resistance in durable press cotton fabric.** Nation Textile Center Annual Report. Available Source: <http://www.sciencedirect.com.htm>, December 17, 2004.

Metcalf and Eddy. 1972. **Wastewater Engineering: Collection, Treatment Disposal.** McGraw-Hill, Inc. New York.

Peter, R.H. 1975. **Textile Chemistry vol III :The Phys Chem of dyeing.**

Reynolds, T.D. and Richards, P.A. 1995. **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering.** 2nd ed. PWS Publishing Co., Boston.

Shore, J. 1990. **Colorant and Auxiliaries: Organic Chemistry and Application Properties vol.1.** Dyer's company publication trust. Yorkshire.

Smulders, S. 2002. **Luandry Detergents.** Wiley-VCH, Germany.

Sauperl, O., K. S. Kleinschek, B. Voncina, M. S Smole and A. M. Marechal. 2003. **Application of spectrophotometric method in assessing the influence of alkaline treatment on the degree of crosslinking of cotton cellulose with BTCA.** Croatica Chemica Acta. Available Source: <http://jagor.srce.hr/ccacaa/CCA-PDF.htm>, December 17, 2004

Tanaka, K., N. Kajiyama, K. Ishikura, S. Waga, A. Kikuchi, K. Ohtomo, T. Takagi and

S. Mizuno. 1999. Determination of the site of disulfide linkage between heavy and light chain of silk fibroin produced by *Bombyx mori* . **Biochem. Biophys. Acta.** **1432:92-103.**

Vigo, T.L. 1994. **Textile Processing and Properties; Preparation, Dyeing , Finishing and Performance.** Elsevier Science B V, Amsterdam.

Zollinger, H. 2003. **Color Chemistry, Synthesis, Properties and Application of Organic Dyes and Pigments.** 3rd ed. Wiley VCH, New York.

ภาคผนวก

1. การวัดจำนวนเกลียวของเส้นด้าย

การบิดเกลียวเส้นด้ายจะเกิดแรงบิดภายในเกลียว หรือ torque ทุกๆ เกลียวจะมีแรงบิดเท่าๆ กัน เส้นด้ายที่มีจำนวนรอบของเกลียวต่อนิ้วเท่ากันก็จะมีแรงบิดเท่ากัน เพราะแรง torque คิดโดยประมาณจะเกือบเท่ากับจำนวนรอบของเกลียวต่อนิ้ว แรงบิดจึงคิดจากจำนวนรอบของเกลียวต่อนิ้ว และสำหรับลักษณะแนวเกลียวจะมี 2 แบบ คือ แบบ S ซึ่งจะมีแนวเกลียวขนานกับเส้นกลางตัวอักษร S และ แบบ Z ซึ่งจะมีแนวเกลียวขนานกับเส้นกลางตัวอักษร Z ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1



S-Twist



ตามเข็มนาฬิกา



Z-Twist



ทวนเข็มนาฬิกา

ภาพผนวกที่ 1 ลักษณะแนวเกลียวแบบ S และ แบบ Z

2. เครื่องมือที่ใช้ในการย้อม



ภาพผนวกที่ 2ก Roaches Beaker Dyer (single bath PYROTECS , Model T.P.C. 1001)



ภาพผนวกที่ 2ข กระบอกเหล็ก ขนาด 200 มิลลิลิตร ที่ใช้ในการย้อม

3. ความคงทนของสีต่อการซัก (Color Fastness to Washing)

ความคงทนของสีต่อการซัก ทดสอบตามวิธีของ British Standard (BS EN 20105-C01 : 1993) การทดสอบใช้เครื่องซักที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ แกนหมุนความเร็ว 40 ± 2 รอบต่อนาทีดังแสดงในภาพผนวกที่ 3 ก การเตรียมชิ้นทดสอบทำได้โดยตัดชิ้นทดสอบขนาด 40 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร ใช้ผ้าขาวสองชั้น โดยที่ชั้นหนึ่งเป็นผ้าไหม และอีกชั้นหนึ่งเป็นผ้าฝ้าย ปิดด้านหน้าและหลังของชิ้น ทดสอบ แล้วเย็บริมทั้งสี่ด้าน จากนั้นทำการทดสอบ ดังนี้

3.1 วางชิ้นทดสอบลงในถ้วยซัก ดังแสดงในรูปที่ 3 ข เติมน้ำสบู่ 5 กรัมต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร อัตราส่วน ระหว่าง น้ำสบู่กับผ้า 50: 1 ของน้ำหนัก อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 นาที

3.2 เมื่อซักเสร็จแล้วให้นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องซัก ล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นสองครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำ ซึ่งไหลตลอดเวลาเป็นเวลา 10 นาที บีบน้ำออกจากชิ้นทดสอบ และด้ายที่เย็บออกสามด้าน โดยเว้นด้านสั้นไว้ด้านหนึ่ง ผึ่งชิ้นทดสอบให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C โดยกางผ้าสามชิ้นออกจากกัน

3.3 หาค่าการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นทดสอบ และค่าการเปื้อนบนผ้าขาว การแปลผลระดับคุณภาพ มีตั้งแต่ระดับ 1-5 ดังนี้

ระดับที่ 1 ต่ำมาก (Very Poor)

ระดับที่ 2 ต่ำ (Poor)

ระดับที่ 3 ปานกลาง (Fair)

ระดับที่ 4 ดี (Good)

ระดับที่ 5 ดีมาก (Excellent)



ภาพผนวกที่ 3ก เครื่องทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก



ภาพผนวกที่ 3ข กระบอกซักที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

4. ความคงทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

ความคงทนต่อการขัดถู ทำการทดสอบได้โดยใช้ Martindale M235 Abrasion Tester ดังแสดงในรูปที่ 4ก และทดสอบตามวิธีของ British standard (BS 5690 : 1991) สำหรับวิธีการทดสอบความคงทนต่อการขัดถูทำได้โดยตัดผ้าตัวอย่าง จำนวน 4 ชิ้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร จากนั้นเตรียมชิ้นงานใส่ใน abrasion holder เพื่อจะทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4ข ใช้น้ำหนักกดทับ 9 KPa จากนั้นทำการขัดถูไปจนกระทั่งเส้นด้ายขาด 2 เส้น ค่าความคงทนต่อการขัดถูได้จากจำนวนรอบหลังจากเส้นด้ายขาด



ภาพผนวกที่ 4ก เครื่องทดสอบความคงทนต่อการขัดถู Martindale M235



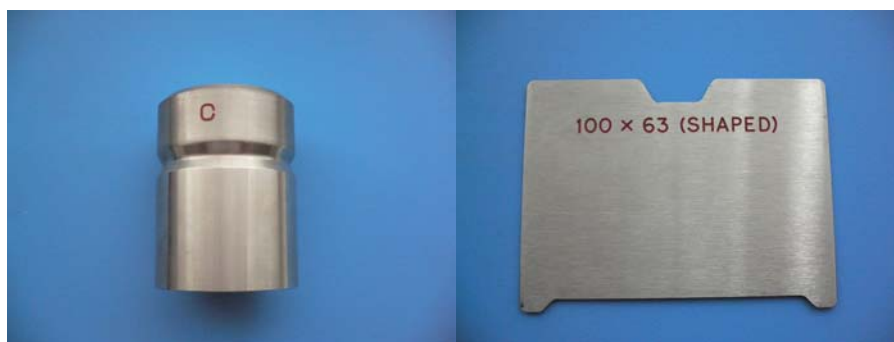
ภาพผนวกที่ 4ข abrasion holder สำหรับการทดสอบความคงทนต่อการขัดถู

5. ความคงทนต่อแรงฉีกขาด (Tear strength)

ความคงทนต่อแรงฉีกขาด ทดสอบได้ด้วย Elmendorf Tearing Tester ดังแสดงในรูปที่ 5ก และทดสอบตามวิธีของ ASTM D-1424: 1983 สำหรับวิธีการทดสอบความคงทนต่อแรงฉีกขาด ทำได้โดยตัดผ้าตัวอย่างในแนวยืนจำนวน 5 ชิ้น และแนวพุ่งจำนวน 5 ชิ้น ตรวจสอบระดับของเครื่องมือ ตั้งให้เข็มอยู่ที่จุดศูนย์ เมื่อปล่อยค้อนน้ำหนักแล้ว จากนั้นทำการทดสอบโดยเริ่มจากยกค้อนน้ำหนัก (pendulum) และตั้งเข็มให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น สำหรับผ้าตัวอย่างจะถูกยึดไว้โดยให้ขอบบนขนานกับที่ยึด และใช้ใบมีดตัดขอบล่างให้เป็นรอยฉีก แล้วจึงปล่อยค้อนน้ำหนักลงมาให้นึกผ้าตัวอย่าง จากนั้นให้อ่านค่าจากสเกล



ภาพผนวกที่ 5ก เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงฉีกขาด ทดสอบได้ด้วย Elmendorf Tearing Tester



ภาพผนวกที่ 5ข ค้อนน้ำหนัก (Pendulum) และแม่พิมพ์ในการตัดผ้าให้ได้ตามขนาด

6. การคืนตัวจากการยับ (Crease recovery)

การคืนตัวจากการยับ ทดสอบได้ด้วย Shirley Crease Recovery Tester ดังแสดงในรูปที่ 6 และทดสอบตามวิธีของ British standard (BS EN 22313: 1992) สำหรับวิธีการทดสอบความคงทนต่อการยับ ทำได้โดยตัดผ้าตัวอย่างขนาด 40 มิลลิเมตร x 15 มิลลิเมตร ในแนวยืน 10 ซีนและแนวพุ่ง 10 ซีน และขั้นตอนในการทดสอบทำได้ดังนี้

6.1 ใส่ตัวอย่างผ้าลงในแผ่นโลหะ (metal foil) จากนั้นพับผ้าตัวอย่างแล้วนำไปสอดไว้ในแผ่นพลาสติก

6.2 ใช้ลูกเหล็กวางกดทับบนชิ้นงาน เป็นเวลา 5 นาที

6.3 ยกลูกเหล็กออก แล้วนำผ้าตัวอย่างซึ่งอยู่ในแผ่นโลหะไปไว้ที่ที่จับชิ้นงาน (specimen grip)

6.4 หลังจากปล่อยให้ผ้าคืนตัวเป็นเวลา 5 นาที แล้วหมุน circular scale ให้ผ้าตัวอย่างอยู่ในแนวตั้งจากนั้นอ่านค่ามุมบน circular scale ซึ่งเป็นค่ามุมการคืนตัวหลังการยับ (crease recovery angle) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศา



ภาพผนวกที่ 6 เครื่องทดสอบการคืนตัวจากการยับ Shirley Crease Recovery Tester

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวกุลลดา เอกบุญชู Kullada Eakboonchoo
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 ตุลาคม 2522
สถานที่เกิด	เพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	วท. บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยศิลปากร (พ.ศ. 2543)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิชาการสิ่งแวดล้อม
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ