

บทนำ

น้ำในโลกนี้มีประมาณ 1,385 ล้านลูกบาศก์เมตรกิโลเมตร ส่วนมากเป็นน้ำเค็มร้อยละ 97.5 น้ำจืดร้อยละ 2.5 น้ำจืดส่วนใหญ่ยังเป็นน้ำแข็งที่ขั้วโลกและธารน้ำแข็งร้อยละ 75 เป็นน้ำใต้ดินร้อยละ 22.5 จะเหลือเพียงร้อยละ 0.34 ของน้ำจืด หรือประมาณ 119,000 ลูกบาศก์กิโลเมตรที่เป็นน้ำผิวดิน ได้แก่ แม่น้ำลำคลอง ทะเลสาบ และหนองบึง จะเห็นได้ว่าน้ำที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด แต่ความต้องการใช้น้ำกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามจำนวนประชากรและความเติบโตทางเศรษฐกิจ ปัจจุบันแหล่งน้ำสะอาดที่มีอยู่ต้องเผชิญกับปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดจากมนุษย์ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทำให้ปัญหาขาดแคลนน้ำทวีรุนแรงมากขึ้นในหลายส่วนของโลก ดังนั้น การใช้ใช้อย่างประหยัดทั้งทางตรงและทางอ้อม และการใช้ใช้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนที่ต้องรีบปฏิบัติ โดยต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกฝ่ายทั้งผู้ผลิต ผู้บริโภค ภาคธุรกิจ ภาครัฐ รวมถึงความร่วมมือระหว่างประเทศ

1. ภาพรวมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอ หมายถึงกระบวนการเปลี่ยนเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยประดิษฐ์ หรือเส้นใยสังเคราะห์ ไปเป็นเส้นด้าย ผืนผ้า เสื้อผ้าสำเร็จรูป และเคหะสิ่งทอ ฯลฯ ประกอบด้วยอุตสาหกรรมย่อยหลายอุตสาหกรรมด้วยกัน คือ อุตสาหกรรมเส้นใย ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำ (upstream) อุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมทอผ้าและถักผ้า และอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำ (midstream) และอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำ (downstream) โดยทุกอุตสาหกรรมย่อยเหล่านี้ มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันทั้งระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1

(1) อุตสาหกรรมเส้นใย แบ่งประเภทของเส้นใยเป็น 2 ลักษณะคือ

- เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม ลินิน ป่าน ปอ เป็นต้น
- เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยไนลอน เส้นใยอะคริลิก และเส้นใยเรยอน

(2) อุตสาหกรรมปั่นด้าย เป็นอุตสาหกรรมที่นำเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์มาตีเกลียวหรือปั่นให้เป็นเส้นด้าย แบ่งเป็น

- เส้นด้ายปั่น (spun yarn) ได้จากเส้นใยสั้น (staple fiber)
- เส้นด้ายใยยาว (filament yarn) ได้จากเส้นใยยาว (filament)

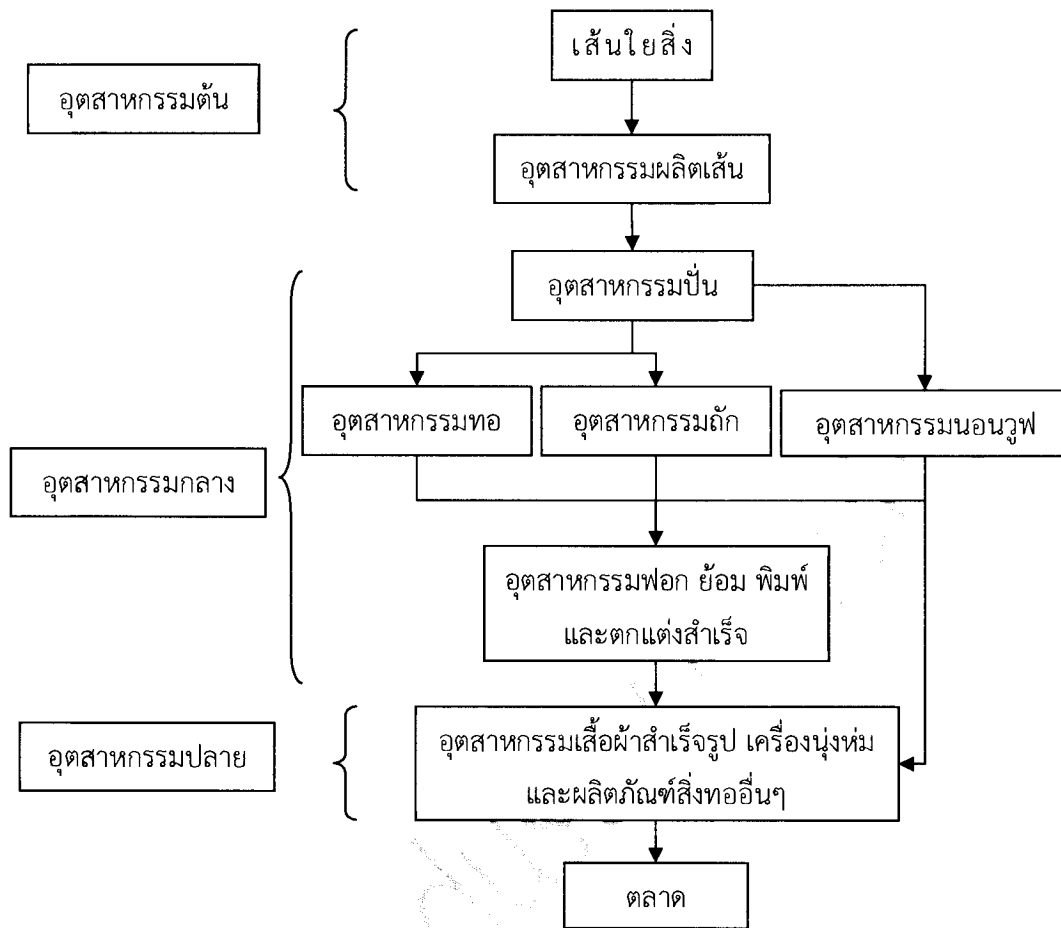
- เส้นด้ายเทกซ์เจอร์ (textured yarn) ได้จากการนำเส้นใยยาวมาตกแต่งสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่นให้ความนุ่มนวล นำสัมผัส และดูดซับน้ำดีขึ้น

(3) อุตสาหกรรมทอผ้าและถักผ้า เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปั่นด้าย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมทอผ้าและถักผ้า ได้แก่

- ผ้าทอ ประกอบด้วยผ้าทอจากใยฝ้าย ใยสังเคราะห์ และใยผสม
- ผ้าถัก ประกอบด้วยผ้าถักจากใยฝ้าย ใยสังเคราะห์ และใยผสม

(4) อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตผ้ายกก่อนออกสู่ผู้บริโภค หรือโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป โดยเพิ่มคุณค่าให้ผ้าผืนในด้านความสวยงาม นำใช้ สวมใส่สบาย และเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในกิจกรรมต่าง ๆ เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ได้อย่างมาก แต่ก็มีปัญหาในส่วนของบริหารจัดการน้ำ ทั้งในส่วนของน้ำใช้ และการปล่อยน้ำเสีย

(5) อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำของระบบโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม ได้แก่ เสื้อผ้าสำเร็จรูปจากการทอ และเสื้อผ้าสำเร็จรูปจากการถัก



รูปที่ 1 โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ

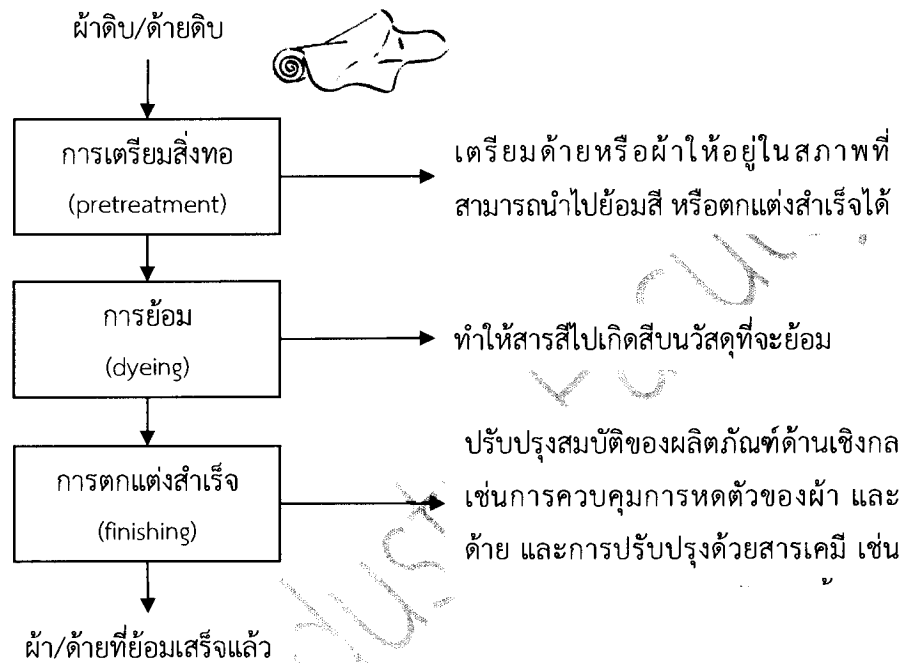
ที่มา : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547: 2.

จากภาพรวมโครงสร้างของอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ พบว่าในส่วนของอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ กระบวนการผลิตส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีซึ่งต้องใช้ สารเคมี และสีย้อมที่เหมาะสม โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง โรงงานฟอกย้อมมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตมาก รวมถึงการใช้พลังงานและเชื้อเพลิงสำหรับเดินเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางน้ำ

การนำเทคโนโลยีสะอาด (clean technology, CT) มาใช้บริหารจัดการและปรับปรุงกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงงานฟอกย้อม เพื่อให้มีการใช้น้ำ พลังงาน สารเคมี และทรัพยากรอื่น ๆ อย่างประหยัด และมีประสิทธิภาพสูงสุด ลดการสูญเสียต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็น และทำให้เกิดของเสียและน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้อยที่สุด

2. กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผ้า หรือเส้นด้ายมีสีสรรสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบาย กระบวนการฟอกย้อมประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการฟอกย้อม

2.1 การเตรียมสิ่งทอ (pretreatment)

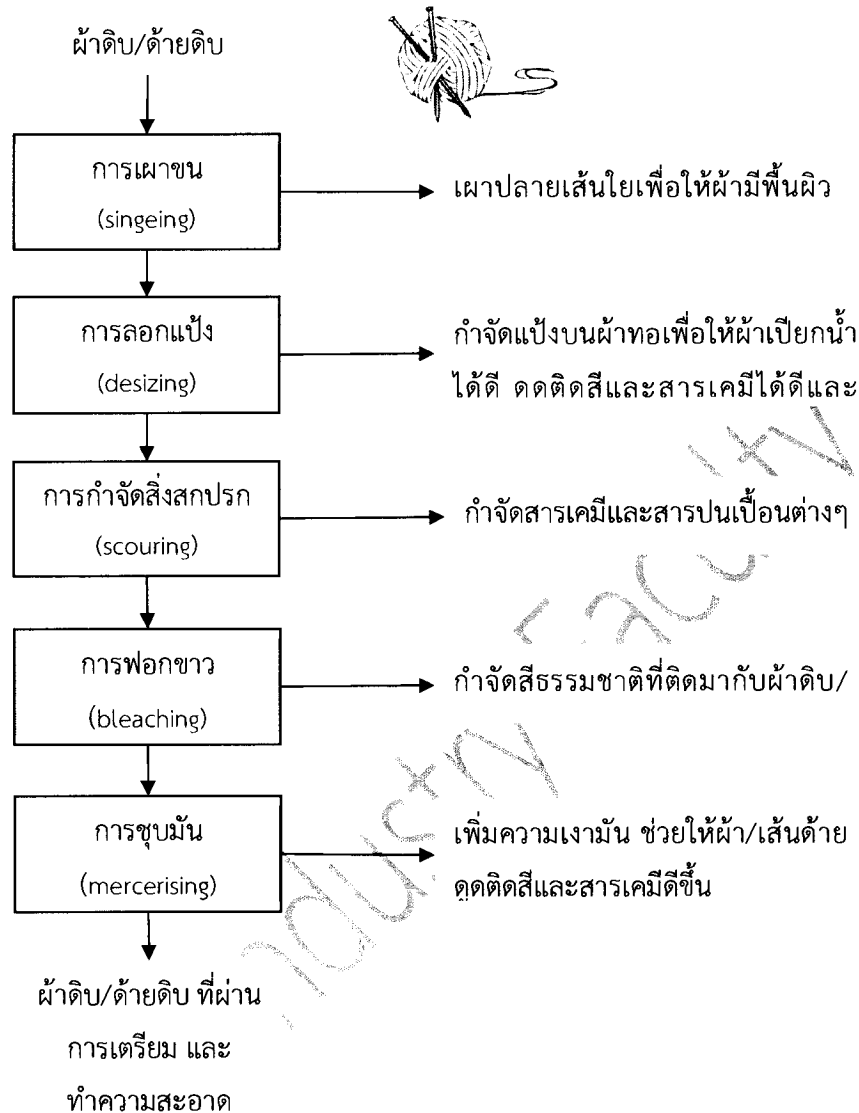
กระบวนการเตรียมสิ่งทอ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เป็นการนำด้าย หรือผ้าดิบที่ออกจากโรงปั่นหรือโรงทอ มาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเตรียมด้าย หรือผ้าดิบให้อยู่ในสภาพที่นำไปให้สี หรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ มีจุดมุ่งหมาย ดังนี้

- กำจัดสิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความขาวและสะอาด และมีการดูดติดสีย้อม และสารเคมีต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ
- ทำให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำ สี และสารเคมีได้ดี ส่งผลให้กระบวนการย้อม พิมพ์ และตกแต่งสิ่งทอ ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ

- ทำให้เส้นใยมีการดูดติดสี และสารเคมีได้มากขึ้น
- ทำให้เส้นใยมีความคงรูป ไม่เสียรูปไปในระหว่างขั้นตอนอื่น ๆ ซึ่งมักเกิดกับใยสังเคราะห์ที่ต้องผ่านกระบวนการเซตด้วยความร้อนก่อน เพื่อป้องกันการหดหรือเสียรูปไปในกระบวนการย้อม

การเตรียมสิ่งทอประกอบด้วยการเผาขน (singeing) การลอกแป้ง (desizing) การกำจัดสิ่งสกปรก (scouring) การฟอกขาว (bleaching) และการชุบมัน (mercerising) ดังแสดงในรูปที่ 3

Textile Technology



รูปที่ 3 กระบวนการเตรียมสิ่งทอ

(1) การเผาขน (singeing)

เส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นที่เรียกว่าเส้นด้ายสปัน มักมีปลายใยโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก และเมื่อเส้นด้ายถูกนำไปทอเป็นผืนผ้า ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้าย ก็จะมีมากขึ้น เนื่องจากการเสียดสีระหว่างการทอ ปลายเส้นใยที่โผล่เหนือผิวด้ายนี้ ทำให้พื้นผิวผ้าดูไม่เรียบ และทำให้ติดสีไม่สม่ำเสมอ จึงมีการกำจัดปลายเส้นใยดังกล่าวด้วยการเผาขนโดยให้ผ้าเคลื่อนที่ผ่านเปลวไฟ หรือแผ่นโลหะที่ถูกเผาจนร้อนในอัตราความเร็วที่เหมาะสม ทำให้ผ้ามีพื้นผิวดูเรียบ และมีความเงามันดีขึ้น การเผาขนส่วนใหญ่จะทำกับผ้าฝ้ายและผ้าใยผสมที่มีฝ้ายเป็นส่วนผสมอยู่

(2) การลอกแป้ง (desizing)

ในการทอผ้า เส้นด้ายยืนจะถูกดึง และเสียดสีอยู่ตลอดเวลา ทำให้เส้นด้ายมีโอกาสขาดได้ง่าย เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าว และทำให้การทอเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ก่อนการทอผ้าจึงนำเส้นด้ายยืนไปลงแป้ง โดยแป้งจะเคลือบอยู่โดยรอบของพื้นผิวเส้นด้าย เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และต้านทานแรงเสียดสีให้กับเส้นด้าย ป้องกันการขาดของด้ายในระหว่างการทอ สารลงแป้งนอกจากมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอาจเป็นแป้งธรรมชาติ หรือแป้งสังเคราะห์ แล้วังมีส่วนผสมของสารขี้ผึ้ง และน้ำมันหล่อลื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสารลงแป้ง ปริมาณสารลงแป้งที่ใช้อาจสูงถึงร้อยละ 10 - 20 ของน้ำหนักเส้นด้ายยืน ในการลงแป้ง สารลงแป้งจะซึมเข้าไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใยภายในเส้นด้าย และเคลือบอยู่บนพื้นผิวโดยรอบเส้นด้ายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ มีผลต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ และสารเคมีของเส้นใย ซึ่งเป็นอุปสรรคในการย้อม และตกแต่งผ้า ทำให้ผ้ามีสัมผัสที่แข็งกระด้าง นอกจากนี้ในบางกรณีการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ พบว่าแป้งที่หลงเหลืออยู่บนผ้า ทำให้ผ้ามีการดูดติดสีย้อมเพิ่มขึ้น โดยสีบางส่วนติดอยู่ที่แป้ง เนื่องจากสีรีแอคทีฟสามารถทำปฏิกิริยาเคมีผนึกติดกับแป้งได้ ทำให้ผ้าที่ได้มีความคงทนของสีอยู่ในระดับต่ำ โดยเฉพาะความคงทนต่อการซัก และต่อการซัก ดังนั้นก่อนการฟอกย้อม จำเป็นต้องมีการกำจัดแป้งออกจากเส้นด้ายยืนก่อนเป็นอันดับแรก เพื่อให้เส้นด้ายมีการดูดซึมน้ำได้ดี มีสัมผัสนุ่ม สามารถดูดซึมสีย้อม และสารเคมีต่าง ๆ ได้ดีและสม่ำเสมอ การลอกแป้งทำได้หลายวิธี เช่น การแช่และหมักด้วยกรด (acid-steeping) การใช้เอนไซม์ และการใช้สารออกซิไดซ์ โดยส่วนใหญ่สารลงแป้งประเภทพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิอะคริเลต จะใช้กับเส้นใยสังเคราะห์ ในขณะที่แป้งธรรมชาติมักใช้กับเส้นใยเซลลูโลสมากกว่า การลอกแป้งมักจะทำโดยใช้เครื่องซักล้างทั้งแบบต่อเนื่อง หรือแบบแบตช์ (batch) เป็นกระบวนการที่ใช้น้ำในปริมาณมากเพื่อลอกแป้งและล้างแป้งออกจากผ้า สารลงแป้งมีส่วนทำให้เกิดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งในปริมาณสูง

(3) การกำจัดสิ่งสกปรก (scouring)

การกำจัดสิ่งสกปรกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับวัสดุสิ่งทอทุกประเภท เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่องค์ประกอบของเส้นใย ได้แก่ ไขมัน ขี้ผึ้ง น้ำมัน และสิ่งสกปรกอื่น ๆ ออกจากวัสดุสิ่งทอ โดยไม่ทำให้สมบัติของเส้นใยเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้เส้นใยสามารถดูดซึมสีย้อม หรือสารตกแต่งได้ดีขึ้น และมีความสม่ำเสมอ

การกำจัดสิ่งสกปรกอาจทำได้โดยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (เพอร์คลอโรเอทิลีน) หรือสารละลายต่าง เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร่วมกับสารช่วยเปียก (wetting agent) และสารจับอนุมูลอิสระ (sequestering agent) ปริมาณสารต่าง ๆ ที่ใช้ ขึ้นกับความสกปรกของวัตถุดิบ และประเภทของเครื่องจักรที่ใช้ น้ำทิ้งจากกระบวนการกำจัดสิ่งสกปรกจะมี

สารเคมี และสารช่วยต่าง ๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการตกค้างอยู่ โดยเฉพาะการกำจัดสิ่งสกปรกของผ้าและขนสัตว์

(4) การฟอกขาว (bleaching)

การฟอกขาว เป็นการกำจัดสีที่มีในเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยประดิษฐ์ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน เมื่อผ่านกระบวนการฟอกขาวแล้ว วัสดุสิ่งทอจะมีความขาว (whiteness) เพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นสำหรับผ้าที่นำไปทำเป็นผ้าขาว และผ้าสีอ่อน (pale shade) เพื่อให้ได้ความขาวหรือได้สีที่สดใส สำหรับผ้าที่นำไปย้อมสีเข้ม และเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งค่อนข้างสะอาด และขาวอยู่แล้วอาจไม่จำเป็นต้องฟอกขาวก็ได้

กระบวนการนี้นอกจากทำให้ผ้าขาวขึ้นแล้ว ยังช่วยกำจัดสิ่งสกปรกบนผ้าด้วย กระบวนการนี้จึงสามารถทำพร้อมกับการกำจัดสิ่งสกปรกในขั้นตอนเดียวกันได้ สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาวแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารออกซิไดซ์ และสารรีดิวซ์ ซึ่งมักใช้สารออกซิไดซ์มากกว่าสารรีดิวซ์ เพราะได้ผ้าที่มีความขาวถาวรมากกว่าการฟอกด้วยสารรีดิวซ์

- สารออกซิไดซ์ ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ($NaOCl$) โซเดียมคลอไรต์ ($NaClO_2$) เนื่องจากกลุ่มสารเคมีที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ มักจะมีความคงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน และเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในภาวะต่างมากกว่า เนื่องจากไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จะสลายตัวให้น้ำและออกซิเจน
- สารรีดิวซ์ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_4$) โซเดียมฟอร์มาลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ($HCHOHSO_2Na \cdot 2H_2O$) โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_5$) การฟอกขาวด้วยสารกลุ่มนี้ได้ความขาวที่ไม่ถาวร (temporary white)

การฟอกขาวด้วยสารออกซิไดซ์ มีผลทำให้ความเหนียวของเส้นใยลดลง ดังนั้นจึงต้องควบคุมภาวะการฟอกให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผ้าที่ขาวตามต้องการ และความเหนียวของเส้นใยลดลงน้อยที่สุด

(4.1) การฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (J. Shore., 1995: 89)

ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ มีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ ลักษณะเป็นของเหลวใส มีความคงตัวสูงในสภาพกรด และแตกตัวได้สารที่เรียกว่า แอคทีฟออกซิเจน (active oxygen) ซึ่งสามารถทำลายสีได้ ต่างเป็นตัวเร่งให้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สลายตัวเร็วขึ้น ในขณะเดียวกันไอออนของโลหะบางชนิดในน้ำเช่น Fe^{2+} และ Cu^{2+} ก็เป็นตัวเร่งให้เกิดการสลายตัวเช่นกัน ในการฟอกต้องควบคุมสภาพต่างที่พีเอชประมาณ 11.5 และมีสารชะลอการสลายตัว (peroxide stabilizer) ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต สารประกอบฟอสเฟต ทำหน้าที่ควบคุมการแตกตัวของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ให้พอเหมาะกับการฟอก

และให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้คือร้อยละ 35 และ 50

(4.2) การฟอกขาวด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (J. Shore., 1995: 88 - 89)

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก และเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ฟอกได้ที่อุณหภูมิห้อง ไฮโปคลอไรต์จะให้ผลการฟอกที่ดีในช่วงพีเอช 11 - 12 ข้อจำกัดของสารฟอกขาวประเภทนี้ คือไม่เหมาะกับการฟอกเส้นใยโปรตีน หรือเส้นใยที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เพราะทำให้เส้นใยเป็นสีเหลืองและเปื่อยได้

(4.3) การฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรต์ (J. Shore., 1995: 88 - 89)

โซเดียมคลอไรต์ที่ใช้ในการฟอกขาวมี 2 ลักษณะ คือเป็นสารละลายและเป็นของแข็ง การฟอกที่ดีจะอยู่ในสภาพกรด ช่วงพีเอชประมาณ 3 - 4 ถ้าต่ำกว่า 3 จะเกิดแก๊สพิษ มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะ ต้องใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน คือ เกลือฟอสเฟต หรือเกลือไนเตรต ข้อดีของการฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรต์ คือ ให้ความขาวมาก และทำลายเส้นใยน้อย สามารถฟอกเส้นใยสังเคราะห์ได้ดี เช่น เส้นใยพอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์ และอะคริลิก

การฟอกขาวที่สมบูรณ์ ต้องให้ผลดังนี้

- ได้ผ้าที่มีความขาวอย่างสม่ำเสมอ และถาวร ผ้าไม่กลับเป็นสีเหลืองเมื่อเก็บไว้นาน
- ผ้าที่ฟอกแล้ว มีการดูดซึมน้ำดี และสารเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ
- ไม่ทำให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง

หลังการฟอกขาวผ้าฝ้าย และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ควรตรวจสอบประเมินผลด้านต่าง ๆ ดังนี้

- ความขาวของผ้า (whiteness) (J. Shore, 1995: 142 - 143)

การฟอกขาวเป็นการกำจัดสีที่มีอยู่ในวัสดุออกไป ทำให้วัสดุนั้นสะท้อนแสงได้ดีขึ้น ในการประเมินค่าความขาว สามารถใช้ค่าการสะท้อนแสง (reflectance) ที่ความยาวคลื่นช่วงสีน้ำเงิน เช่นที่ความยาวคลื่น 460 นาโนเมตร ผ้าฝ้ายก่อนฟอกขาวอาจมีค่าการสะท้อนแสงที่ 460 นาโนเมตร เท่ากับ ร้อยละ 55 หลังจากการฟอกขาวแล้วจะมีค่าการสะท้อนแสงมากขึ้นเท่ากับร้อยละ 83-85 ส่วนผ้าที่ฟอกขาวเพื่อนำไปใช้ในการย้อมหรือพิมพ์ อาจทำให้มีการสะท้อนแสงในช่วงร้อยละ 78-82 ก็เพียงพอ

- การดูดซึมน้ำ (water absorbency) ผ้าที่ผ่านการฟอกแล้ว จะต้องมีการดูดซึมน้ำได้ดี โดยหยดน้ำที่ตกบนผ้าจะต้องซึมหายไปภายใน 1 วินาที

- ความเสียหายทางเคมี และทางกายภาพที่เกิดขึ้น ได้แก่ การขาดเป็นรูพรุน (pin hole) การที่ผ้าขาดเป็นรูพรุน มักมีสาเหตุจากการมีไอออนของโลหะหนักโดยเฉพาะไอออนของเหล็กอยู่ในน้ำ ไอออนของโลหะเหล่านี้สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดการออกซิไดซ์ทั้งสารสีในเส้นใย และโครงสร้างโมเลกุลของใยผ้า ทำให้ผ้าเปื่อยและขาดเป็นรู รวมถึงการสูญเสียความแข็งแรง
- สารเคมีตกค้าง ได้แก่ สารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(5) การชุบมัน (mercerising)

การชุบมัน ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการสำหรับเส้นใยฝ้ายและลินิน ทำให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดีขึ้น มีความเงามัน และมีความแข็งแรงมากขึ้น ประเภทของการชุบมัน แบ่งตามสารเคมีที่ใช้เป็น 2 ประเภท คือ การชุบมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการชุบมันด้วยแอมโมเนียเหลว โดยให้สารละลายต่างเข้มข้นซึมเข้าไปภายในผ้าขณะที่ผ้าถูกดึงให้ตึงอยู่ จากนั้นจึงนำไปล้างกระบวนการนี้ทำให้ผ้ามีค่าบีโอดี และปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำ แต่มีความเป็นด่างสูง

2.2 การย้อมผ้า (dyeing process) และการพิมพ์ผ้า (printing process)

การให้สีวัสดุสิ่งทอในระบบอุตสาหกรรม ทำได้ 2 วิธี คือ การย้อม และการพิมพ์ หลักการย้อมคือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สีที่ละลาย หรือกระจาย อยู่ในสารละลาย (dispersion) ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุ (substrates) ที่จะย้อม เช่นเส้นใย เส้นด้าย ผ้า และเสื้อผ้า การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในวัสดุอย่างสม่ำเสมอ จุดประสงค์หลักของการย้อม คือได้สีสม่ำเสมอ มีความคงทนทั้งการใช้งาน และกระบวนการผลิตในขั้นต่อมา ส่วนการพิมพ์คือ การทำให้เกิดสีเป็นลวดลายตามที่ต้องการ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการย้อมเฉพาะแห่ง

วัสดุสิ่งทอที่ผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้ว และนำไปย้อม กลไกของการดูดซึมสีย้อม และการเกาะติดแน่นของสีบนเส้นใยจะมีความซับซ้อนมาก แต่โดยหลักการทั่วไปแล้ว สีย้อมจะต้องทำให้อยู่ในรูปสารละลาย แล้วทำให้มีการดูดซึมสารละลายสีย้อมโดยเส้นใยในอ่างย้อม (dye bath) แรงที่ทำให้เกิดการดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยของโมเลกุลสีย้อมอาจเป็นแรงทางเคมี เช่นแรงโคเวเลนต์ แรงไอออนิก หรือแรงดึงดูดทางกายภาพ เช่นแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น ดังนั้นปัจจัยด้านระยะเวลาในการย้อม อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง (pH) และสารเคมีช่วยย้อมต่าง ๆ เช่น เกลือ (electrolytes) ตัวทำละลาย (solvents) สารลดแรงตึงผิว (surface active agents) จะมีผลต่อประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของสีย้อมที่จะติดบนเส้นใย รวมไปถึงการให้สารละลายสีย้อมเคลือบ

หุ้มตลอดผิวหน้าของวัสดุที่จะย้อม และให้เวลาในการย้อมลดลง การเพิ่มอัตราการแพร่กระจาย (diffusion) ของโมเลกุลสีย้อมไปยังเส้นใยทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมให้สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมทำให้การแพร่กระจายของสีย้อมบนผิวหน้าเส้นใยมีความสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ในกรณีของเส้นใยประดิษฐ์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic synthetic fibers) จะสามารถเพิ่มอัตราการแพร่กระจายของสีย้อมโดยใช้สารแคริเออร์ (carriers) สารอินทรีย์ช่วยย้อมต่าง ๆ หรือเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยใช้เครื่องย้อมระบบปิด (closed dyeing system)

ความคงทนของสีย้อมขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ในการย้อม เช่น ชนิดของสีย้อม กระบวนการย้อม การเตรียมน้ำย้อม และภาวะการย้อม

2.2.1 ชนิดของเส้นใย

เส้นใยที่นำมาผลิตเป็นวัสดุสิ่งทอ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- เส้นใยธรรมชาติ (natural fibers) เช่น ฝ้าย ขนสัตว์ ไหม เป็นต้น
- เส้นใยประดิษฐ์ (man-made fibers) เช่น เรยอน ไนลอน อะคริลิก อะซิเตต และพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น

เส้นใยธรรมชาติย้อมง่ายกว่าเส้นใยประดิษฐ์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติดูดซึมน้ำได้ดี และเมื่อเปียกน้ำจะมีการพองตัว ทำให้สีย้อมซึ่งละลายในน้ำแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ง่าย ส่วนเส้นใยประดิษฐ์ เช่น พอลิเอสเทอร์ดูดซึมน้ำได้น้อย เพราะโครงสร้างของเส้นใยแน่นมาก สีย้อมแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ยาก ทำให้การย้อมเกิดขึ้นได้ยากกว่า การย้อมเส้นใยประดิษฐ์จึงต้องเลือกสีย้อมให้เหมาะสมกับประเภทเส้นใยนั้น ๆ

2.2.2 กระบวนการย้อม (Dyeing processes)

การย้อมวัสดุสิ่งทอทำได้หลายวิธี ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ผู้ย้อมสามารถเลือกใช้วิธีการย้อมที่เหมาะสมกับสภาพโรงงาน และความต้องการเฉพาะกรณีได้ ในการเลือกใช้วิธีการย้อมที่เหมาะสม สิ่งที่ต้องคำนึงได้แก่ ลักษณะของวัสดุที่จะย้อม ประเภทของเครื่องจักรที่มีอยู่ และประโยชน์ใช้สอยของวัสดุที่จะย้อม ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้น้ำ คือ อัตราส่วนระหว่างสารละลายน้ำย้อมต่อปริมาณของน้ำหนักผ้า (Liquor ratio, L:R) ซึ่งเครื่องย้อมแต่ละชนิดจะมีค่า L:R แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนระหว่างสารละลายน้ำย้อมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักผ้า (Liquor ratio)

ชนิดของเครื่องย้อม	ลิตร/กิโลกรัม
เครื่องวินช์ (Dyeing winches)	20-30 : 1
เครื่องแฮงค์ (Hank machines)	30 : 1
เครื่องเจ็ต (Jet dyeing)	7-10 : 1
เครื่องแพคเกจ (Package dyeing)	5-8 : 1
เครื่องแพด (Pad batch)	5 : 1
ULLR dyeing	5 : 1

ที่มา: EPA, 1998.

กรรมวิธีการย้อมผ้าและเส้นด้าย แบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

(1) การย้อมแบบแบตช์ หรือการย้อมแบบดูดซึม (batch หรือ exhaustion method)

ในการย้อมโดยวิธีนี้ ผ้าหรือวัสดุที่ย้อมจะถูกแช่ หรือหมุนในอ่างย้อม จนกระทั่งย้อมเสร็จสมบูรณ์ (batchwise process) เครื่องย้อมที่ใช้กันมากสำหรับการย้อมแบบดูดซึมคือ เครื่องจิกเกอร์ เครื่องเจ็ต เครื่องวินช์ เครื่องย้อมด้าย

(2) การย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous method)

การย้อมแบบวิธีกึ่งต่อเนื่อง หรือวิธีจุ่มอัดสี (pad-batch dyeing) ในกรณีของการย้อมผ้าผ้าย ด้วยสีรีแอคทีฟประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

การอัดน้ำสีและด่าง → การม้วนเก็บ → การซัก

เครื่องย้อมที่ใช้ประกอบด้วยอ่างน้ำย้อมสำหรับจุ่มผ้า ลูกกลิ้งสำหรับอัดรีดเอาน้ำย้อมส่วนเกินออกจากผ้า ลูกกลิ้งสำหรับม้วนเก็บผ้า และอ่างซัก

การอัดน้ำสีและด่าง

ในขั้นตอนนี้ สีย้อมและด่างจะถูกผสมลงไปพร้อมกันในอ่างสี ผ้าจะถูกผ่านไปในน้ำย้อม และต่อไปยังลูกกลิ้ง เพื่อเตรียมนำไปม้วนเก็บในขั้นต่อไป ในขั้นตอนนี้ สิ่งที่สำคัญคือ การควบคุมความเข้มข้นของน้ำสีในอ่างย้อม และแรงอัดของลูกกลิ้ง เพื่อให้ย้อมได้ระดับความเข้มข้นตามต้องการ นอกจากนี้การควบคุมความเข้มข้นของน้ำสีในอ่างย้อมให้คงที่ตลอดการผ่านผ้าเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อให้ไม่ในส่วนหัวผ้าและส่วนปลายผ้า มีระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน การลดปัญหาในเรื่องนี้ ทำได้โดย

- พยายามให้ผ้ามีเวลาที่จุ่มอยู่ในน้ำสีให้น้อยที่สุด
- ทดแทนน้ำสีส่วนที่ถูกดูดซึมไป ด้วยการเติมน้ำสีใหม่ในปริมาณที่เหมาะสมลงไปอ่างย้อม

การม้วนเก็บ

หลังจากที่ผ้าได้รับน้ำสีและด่าง ในปริมาณที่เหมาะสมแล้ว จะถูกนำไปม้วนเก็บในลักษณะที่ยังม้วนพันอยู่บนลูกกลิ้ง และหมุนตลอดเวลา เพื่อให้สีย้อมได้มีเวลาแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใย ม้วนผ้าจะถูกห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ในเวลานี้ม้วนผ้า ก็ถูกหมุนไปเรื่อยๆ ตามแกนของลูกกลิ้ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซึมของน้ำสีในทิศทางใดเป็นพิเศษ สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บขึ้นกับความว่องไวต่อปฏิกิริยาของสี ความแรงของด่างที่ใช้ และอุณหภูมิของการเก็บ

ข้อแตกต่างของการย้อมด้วยวิธีจุ่มอัดน้ำสี แตกต่างจากการย้อมแบบดูดซึม คือ วิธีจุ่มอัดน้ำสี อัตราส่วนน้ำหนักสารละลายสีย้อมต่อน้ำหนักผ้า (liquor ratio) ในเกณฑ์ที่ต่ำมากคือ 1:1 เท่านั้น และร้อยละการติดสีสูงกว่าทำให้ประหยัดสีมากกว่า

(3) การย้อมโดยวิธีต่อเนื่อง (continuous method)

การย้อมวิธีนี้จะใช้ลูกกลิ้ง (padder) อัดน้ำสีเข้าไปในเนื้อผ้า โดยผ้าจะเคลื่อนที่ไปตามขั้นตอนการย้อมต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหยุดแช่อยู่ที่จุดใด ตั้งแต่เป็นผ้าขาว จนกระทั่งออกมาเป็นผ้าย้อมสำเร็จ เป็นวิธีการย้อมที่เร็วที่สุด เหมาะกับการย้อมทีละมาก ๆ แต่มีข้อเสียคือ ถ้ามีการผิดพลาดเกิดขึ้นในระหว่างการย้อม กว่าที่ข้อผิดพลาดนั้นจะถูกค้นพบและได้รับการแก้ไข อาจทำให้เสียผ้าไปเป็นจำนวนมาก ดังนั้นก่อนการย้อมต้องมีการเตรียมการอย่างระมัดระวังมากที่สุด

2.2.3 เครื่องจักรย้อมสี

(1) เครื่องจิกเกอร์ (jigger) เป็นเครื่องย้อมที่เหมาะสมสำหรับผ้าทอ ในขณะที่ย้อม ผ้าจะถูกเปิดหน้าผ้าออก และมีการดึงให้ผ้าเคลื่อนที่ เครื่องย้อมจิกเกอร์สามารถย้อมผ้าที่มีขนาดหน้าผากว้างต่าง ๆ กันได้ดี รวมทั้งมีระบบควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ของผ้าจากลูกกลิ้งหนึ่งไปยังอีกลูกกลิ้งหนึ่ง เป็นระบบธรรมดา หรือระบบอัตโนมัติ

(2) เครื่องจุ่มอัดน้ำสี (padding mangle) เป็นเครื่องที่เหมาะสมสำหรับการย้อมสรีร์แอคทีฟ และสีแวต ประกอบด้วยลูกกลิ้งยาง 2 ลูก หรือ 3 ลูก แต่โดยทั่วไปนิยมใช้แบบ 2 ลูก บีบกันด้วยแรงที่สม่ำเสมอตลอดแนวลูกกลิ้ง และอ่างน้ำสีควรเป็นอ่างขนาดเล็ก เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำสีในการย้อม

(3) เครื่องย้อมสีแบบต่อเนื่อง (continuous dyeing range, CDR) เป็นเครื่องย้อมสีที่ประกอบด้วยเครื่องจุ่มอัดสี เครื่องอบแห้ง เครื่องจุ่มอัดสารเคมี เครื่องอบไอน้ำ เครื่องซักล้างและเครื่องทำแห้ง แต่ละเครื่องทำหน้าที่ต่อเนื่องกัน ให้ผลผลิตสูง ใช้แรงงานน้อย ย้อมได้ครั้งละมาก ๆ

(4) เครื่องย้อมเจ็ต (jet dyeing machine) เป็นเครื่องย้อมผืนผ้าในรูปแบบของผ้าผืนที่เย็บต่อกันเป็นวงกลม (rope form) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้สัดส่วนของน้ำย้อมต่ำ เหมาะกับการย้อมผ้าพอลิเอสเตอร์ ความเร็วของผ้าขณะย้อมประมาณ 250-600 เมตรต่อนาที ทำให้ได้ผลการย้อมที่สม่ำเสมอดี เครื่องจะมีระบบควบคุมระดับน้ำย้อม การไหลเวียนของน้ำย้อม และอุณหภูมิการย้อมได้อย่างแม่นยำ

(5) เครื่องวินช์ (winch) เป็นเครื่องย้อมที่เกิดแรงดึงในผ้าต่ำ เหมาะกับการย้อมผ้าถัก หรือผ้ายัด ไม่เหมาะกับการย้อมสื่อนอน

(6) เครื่องย้อม빔 (HT-HP, beam dyeing machine) ใช้ย้อมผ้าพอลิเอสเตอร์ และผ้าใยผสมพอลิเอสเตอร์กับฝ้าย ย้อมที่อุณหภูมิสูง ความดันสูง ผ้าที่ย้อมจะพันอยู่บนแกน (beam) ที่มีรูพรุน ผ้าที่พันบนแกนต้องเรียบ ไม่มีรอยยับใช้สัดส่วนน้ำย้อมต่อผ้าค่อนข้างสูง ขณะย้อมเครื่องจะฉีดน้ำย้อมจากภายในแกนที่มีรูพรุนออกมาที่ผ้า อุณหภูมิการย้อมอยู่ระหว่าง 125-135 °C ขึ้นกับชนิดของผ้า และสีย้อม การย้อมจะเป็นการย้อมแบบดูดซึม ในภาวะอุณหภูมิและความดันสูง

2.2.4 สีย้อม (Dyestuff)

สีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยมีหลายชนิด การย้อมที่จะให้ผลดีนั้นขึ้นกับโครงสร้างทางโมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใย สีย้อมส่วนมากเป็นสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds)

ลักษณะของสีย้อม

- ความสามารถในการละลาย (solubility) สีย้อมต้องมีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้อย่างถาวร เช่น -OH, -NH₂, -SO₃Na หรือมีกลุ่มที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปการละลายน้ำ หรือกระจายตัวในน้ำได้
- การดูดซึมและติดอยู่ในเส้นใย (substantivity) กลุ่มเคมีที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อม จะเป็นกลุ่มที่บอกว่สีนั้น มีความสามารถในการดูดซึม และติดอยู่ในเส้นใยแต่ละชนิดได้หรือไม่ ได้แก่หมู่ที่มีประจุลบ (anionic group) หมู่ที่มีประจุบวก (cationic group) หมู่ที่มีประจุ (polar group) หมู่ฟีนอลิก (phenolic group) หมู่ควิโนน (quinone group) และหมู่ไพรมารีเอมีน (primary amino group) เป็นต้น
- ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นกับเส้นใย (reactivity) สีย้อมต้องมีกลุ่มเคมีที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี (reactive group) สามารถทำปฏิกิริยาเคมี โดยเกิดเป็นพันธะต่างๆกับโมเลกุลเส้นใย ทำให้สีย้อมอยู่ในโมเลกุลของเส้นใยอย่างถาวร
- ความคงทนต่อสภาวะการกระทำต่าง ๆ (fastness) นอกจากจะต้องมีความคงทนต่อกระบวนการผลิตขั้นต่าง ๆ ที่ตามมาภายหลังการย้อมสีแล้ว สีย้อมยังต้องมีความคงทนต่อ

สภาวะการกระทำต่าง ๆ ในการใช้งาน เช่น ความคงทนต่อเหงื่อ การขัดสี การซักกรีด ความร้อน แสงแดด เป็นต้น

สีย้อมชนิดต่าง ๆ มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และมีวิธีการที่ต่างกันในการนำไปย้อมกับเส้นใยชนิดต่าง ๆ ตารางที่ 2 แสดงประเภทของสีย้อมที่นิยมใช้กับเส้นใยประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ประเภทของสีย้อมที่นิยมใช้กับเส้นใยประเภทต่าง ๆ

ประเภทของสีย้อม	ประเภทของเส้นใย
สีแอซิด (acid)	ไนลอน ขนสัตว์ ไหม
สีอะโซอิก (azoic)	ฝ้าย เรยอน
สีเบสิก (basic)	พอลิเอคริไลน์ไทรล์ โมดิฟายไนลอน
สีไดเรกต์ (direct)	ฝ้าย เรยอน ไนลอน
สีดีสเพอร์ส (disperse)	พอลิเอสเตอร์ อะซิเตด
สีรีแอคทีฟ (reactive)	ฝ้าย ขนสัตว์ ไหม
สีซัลเฟอร์ (sulphur)	ฝ้าย เรยอน
สีแวต (vat)	ฝ้าย เรยอน

ที่มา: K. Hunger., 2003: 4.

(1) สีไดเรกต์(direct dye)

สีไดเรกต์ เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้และมีประจุลบ สามารถย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดี เช่น ฝ้าย(cotton) วิสโคส เรยอน (viscose rayon) คิวพราโมนีเยม เรยอน (cupramonium rayon)

สีไดเรกต์เป็นสีที่ใช้ง่าย ราคาถูก มีสมบัติความคงทนต่าง ๆ ต่ำ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีประเภทนี้กับเส้นใยเป็นพันธะอ่อน ๆ เช่นพันธะไฮโดรเจน พันธะแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนด้วยกระบวนการหลังการย้อม (aftertreatment of direct dye) หรือตกแต่งให้คงทนต่อการยับด้วยเรซิน ซึ่งจะช่วยให้สีคงทนยิ่งขึ้น การย้อมสีประเภทนี้ต้องอาศัยเกลือ (electrolyte) เพื่อทำให้ประจุภายในเส้นใยลดลง หรือหายไป ช่วยเร่งการดูดซึมของสี โดยสีไดเรกต์มีการดูดซึมสีได้ดีที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ขึ้นกับโครงสร้างสี

(2) สีซัลเฟอร์ (sulphur dyes)

สีซัลเฟอร์เป็นสีย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยเฉพาะย้อมผ้าฝ้ายให้ความคงทนต่อภาวะต่าง ๆ ได้ดี มีขอบเขตของสีค่อนข้างจำกัด ส่วนใหญ่เป็นสีทึบ ด้านไม่ค่อยสดใส โมเลกุลของสีจะมีพันธะที่เชื่อมระหว่าง ซัลเฟอร์ 2 อะตอม (sulphur linkage) ปกติไม่ละลายน้ำ หรือละลายบ้างเล็กน้อย แต่จะละลายในสารละลายของสารรีดิวซ์ เช่นโซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulphite) ซึ่งจะรีดิวซ์โมเลกุลสี ให้

แตกออกตรงตำแหน่งที่เชื่อมระหว่างซัลเฟอร์ 2 อะตอม เกิดเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ ที่ละลายน้ำ และสามารถยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลส

(3) สีแหวด (vat dye)

สีแหวด มีสมบัติเฉพาะตัวคือ ไม่ละลายน้ำ และมีสีเกือบทุกเฉดสี (shade) ในการย้อมสีแหวด ขั้นแรกต้องทำให้สียอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ โดยการรีดิวซ์สีแหวดด้วยโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ในสารละลายต่างแก่ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ในสภาพนี้สีแหวดจะมีลักษณะเป็นสารประกอบลิวโค (leuco) ซึ่งละลายน้ำได้ และมีความสามารถในการยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลส หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการออกซิไดส์ เพื่อให้สีแหวดเปลี่ยนกลับสู่สภาพที่ไม่ละลายน้ำ

การย้อมสีแหวด โดยทั่วไปย้อมด้วยวิธีการดังนี้

- ย้อมแบบดูดซึมด้วยเครื่องจิกเกอร์ (exhaustion dyeing in jigger)
- จุ่มอัดสี ทำให้สีติดเส้นใยด้วยเครื่องจิกเกอร์ (Pad-Jig-develop)
- การย้อมแบบต่อเนื่อง (continous dyeing)

(4) สีรีแอคทีฟ (reactive dye)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่มีประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยสีจะทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกไซด์ (-OH) ของเส้นใยเซลลูโลส ในน้ำย้อมที่ภาวะต่าง เกิดพันธะเคมีแบบโควาเลนต์ระหว่างสีรีแอคทีฟกับเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ให้สีที่มีความสดใส มีความสม่ำเสมอ และมีความคงทนต่อการซักดี

ในปัจจุบันการย้อมเซลลูโลส นิยมย้อมด้วยสีรีแอคทีฟเนื่องจากเป็นสีย้อมที่สามารถย้อมได้เกือบทุกเฉด สีที่ได้มีความสดใส แต่การย้อมสีรีแอคทีฟต้องควบคุมการย้อมอย่างใกล้ชิด เพราะอาจทำให้ผลการย้อมไม่เป็นไปตามต้องการ

การย้อมสีรีแอคทีฟ ใช้อุณหภูมิในช่วง 40 - 90 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของกลุ่มที่จะเกิดปฏิกิริยาของสี (สีย้อมเย็น หรือย้อมร้อน) ในขณะย้อมต้องใช้สารช่วย กลือและต่าง ในปริมาณที่เหมาะสม การย้อมสีรีแอคทีฟสามารถย้อมได้หลายวิธี ดังนี้

- ย้อมแบบดูดซึมด้วยเครื่องย้อมแบบจิกเกอร์ (jigger) หรือเครื่องวินช์ (winch)
- จุ่มอัดสี อบแห้ง ทำให้สีติดด้วยเครื่องจิกเกอร์ (pad-dry-jig develop)
- จุ่มอัดสี ทำให้สีติดด้วยเครื่องจิกเกอร์ (pad-jig develop wet on wet)
- จุ่มอัดสี ทำให้สีติดด้วยการหมักทิ้งไว้ (pad-batch)

- ย้อมแบบต่อเนื่องโดยจุ่มอัดสี อบแห้ง จุ่มอัดสารเคมี (ต่าง) อบไอน้ำ เพื่อให้สีติด (continuous dyeing)
- จุ่มอัดสี อบแห้ง อบไอน้ำทำให้สีติด (pad-dry-stream)
- จุ่มอัดสี อบแห้ง อบความร้อนแห้ง ทำให้สีติด (pad-dry-bake)

(5) สีแอซิด (acid dye)

สีแอซิดเป็นสีประจุลบ (anionic dye) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม และเส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน ในภาวะที่เป็นกรด โดยใช้กรดซัลฟิวริก กรดฟอร์มิก กรดแอซติก พีเอชของน้ำย้อมอยู่ระหว่าง 2 - 7 ขึ้นกับชนิดของเส้นใยที่ใช้ย้อม ความเข้มข้นของสีที่ต้องการ และชนิดของกรดที่ใช้ การย้อมด้วยสีแอซิดให้เฉดสีที่สดใส ถ้าเลือกสีที่เหมาะสมจะได้สีที่มีความคงทนต่อแสงดีมาก สมบัติด้านความคงทนตลอดจนความสม่ำเสมอของสีแต่ละตัวขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของสี

(6) สีเบสิก (basic dye)

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

(7) สีดิสเพอร์ส (disperse dye)

สีดิสเพอร์สเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติละลายน้ำได้ต่ำ ต้องใช้สารเคมีช่วยย้อมที่ช่วยให้สีกระจายตัวในน้ำย้อม (dispersing agent) ใช้ย้อมเส้นใยไนลอน และพอลิเอสเตอร์

การย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์แบบดูดซึมด้วยสีดิสเพอร์ส ที่ภาวะบรรยากาศปกติ อุณหภูมิไม่เกิน 100 °C การย้อมจะเริ่มที่อุณหภูมิ 50 °C ปรับสภาพน้ำย้อมให้มีค่าพีเอช 4.5-5.0 โดยใช้สารช่วยย้อมช่วยกระจายสีในน้ำย้อม (dispersing agent) และสารแคริเออร์ (carriers)

การย้อมสีดิสเพอร์สแบบดูดซึมโดยใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 130 °C จะทำให้ผลการย้อมที่ดีกว่าการย้อมที่ภาวะบรรยากาศปกติ โดยการย้อมทำในลักษณะเดียวกัน แต่ไม่จำเป็นต้องใช้สารแคริเออร์สามารถใช้เครื่องย้อมได้หลายชนิด เช่น เครื่องย้อมบีม (beam) เครื่องย้อมเจ็ต (jet) เครื่องย้อมแพคเกจ (package)

การย้อมสีดิสเพอร์ส โดยวิธีย้อมแบบต่อเนื่องเหมาะกับการย้อมเส้นใยผสมพอลิเอสเตอร์กับฝ้าย ย้อมโดยการจุ่มอัดสารละลายสีดิสเพอร์สลงบนผ้า ในสารละลายสีประกอบด้วยสารช่วยย้อมพวก dispersing agent และสารละลายป้องกันการเคลื่อนตัวของสี (anti-migration) จากนั้นนำผ้าไปทำให้

แห้งอย่างช้าๆ แล้วอบด้วยความร้อนแห้งที่อุณหภูมิ 180-210 °C เวลา 60-90 วินาทีเพื่อให้สื่อนึกติดกับเส้นใย ความเร็วในการย้อมแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องจักรทำได้ถึง 90 เมตรต่อวินาที

(8) สียอะโซอิก (azoic dye)

สียอะโซอิก เป็นสารประเภทแนพทอล (naphthol) จะเกิดสีบนเส้นใยได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสาร 2 ชนิดคือ (1) สารแนพทอล (naphthol) และ (2) สารอะโซอิกไดเอโซ (azoic diazo component) ในระหว่างการย้อม การย้อมสียอะโซอิกทำได้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

- แช่ผ้าในสารละลายแนพทอล ด้วยเครื่องจิกเกอร์ หรืออัดสีด้วยลูกกลิ้ง เรียกว่าการทำ naphtholation (jigger/padding)
- ทำให้เกิดปฏิกิริยา diazotized และ coupling ด้วยเครื่องจิกเกอร์ หรืออัดด้วยลูกกลิ้ง เรียกว่าการทำ diazotization and coupling (jigger/padding)

2.3 การตกแต่งสำเร็จ (finishing process)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการสุดท้ายในกระบวนการฟอกย้อม และพิมพ์ผ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุง/เปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มเติมสมบัติอื่น ๆ ให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ หรือลูกค้า เช่น การคงรูป สมบัติการทนต่อการยับ ความนิ่ม การตกแต่งไม่ให้เปียกน้ำหรือจับฝุ่น และความสามารถในการทนไฟ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่วัสดุสิ่งทอที่ผ่านกระบวนการนี้แล้ว จะไม่นำกลับมาล้างทำความสะอาดอีก

การตกแต่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือการตกแต่งเชิงกล และการตกแต่งทางเคมี ในกรณีของการตกแต่งเชิงกล จะใช้เครื่องจักรกลทำให้เกิดสมบัติต่างๆ ส่วนการตกแต่งทางเคมี แบ่งออกเป็นการตกแต่งแบบถาวร และไม่ถาวร

การตกแต่งด้วยเรซิน

วัตถุประสงค์หลักของการตกแต่งแบบเรซิน คือ การปรับปรุงการคืนตัวของรอยยับ ทั้งขณะแห้งและเปียก และคงรูปของรอยจีบบนผ้า ส่วนใหญ่ทำบนผ้าฝ้าย และผ้าใยผสมฝ้ายกับเส้นใยประดิษฐ์ การตกแต่งด้วยเรซินมี 3 ชนิด เป็นหลักคือ

- การตกแต่งป้องกันรอยยับ (Anti-crease finishing)
- การตกแต่งซักแล้วสวมใส่ได้เลย (wash and wear finishing)
- ทำให้รอยจีบคงรูปได้นาน (durable press treatment)

การตกแต่งป้องกันรอยยับ และการตกแต่งแล้วสวมใส่ได้เลย มีพื้นฐานเหมือนกัน แตกต่างเพียงชนิดและระดับการคืนตัวของรอยยับ ในกรณีของการตกแต่งป้องกันรอยยับ ผ้าที่ผ่านการตกแต่งแล้วมีการคืนตัวของรอยยับประมาณ 230°C ส่วนการตกแต่งซิกแล้วสวมใส่ได้เลย มีการคืนตัวขณะแห้งและเปียกประมาณ 240°C กระบวนการที่ใช้เป็นหลัก มี 2 วิธี ได้แก่

- จุ่มอัดน้ำยา → ทำให้แห้ง → ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (pad-dry-cure)
- จุ่มอัดน้ำยา → ทำให้แห้ง → ทั้งให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง (wet-cross-linking)

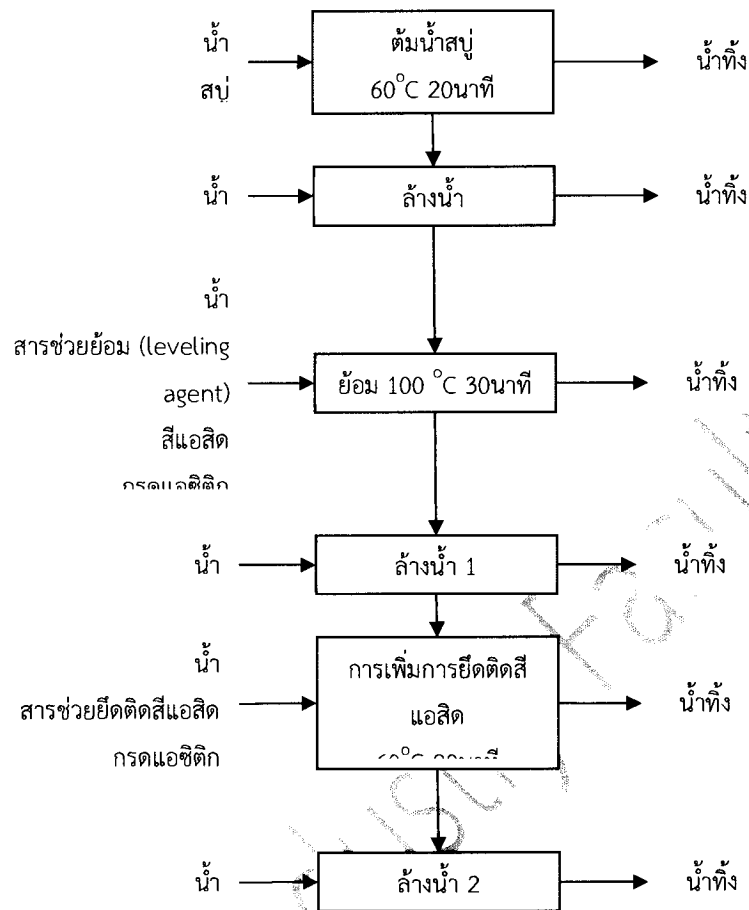
ในกรณีของ pad-dry-cure ผ้าถูกจุ่มอัดด้วยน้ำยาเรซินทำให้แห้งด้วยเครื่องตั้งหน้าผ้า และทำให้เกิดปฏิกิริยาในตูอบ หลังจากทำให้เกิดปฏิกิริยาแล้ว ล้างผ้าด้วยสบู่และโซดาแอช เพื่อกำจัดสารที่สลายตัวจากผ้าที่เกิดปฏิกิริยา

ในกรณีของ wet-cross-linking ปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดระหว่างเซลลูโลสและสารเรซินในสภาวะที่เป็นกรด ผ้าถูกจุ่มด้วยสารละลาย thermosetting resin กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือต่าง และ thermoplastic resin หลังจากนั้นผ้าถูกหมักไว้ 10-16 ชั่วโมง ขึ้นกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

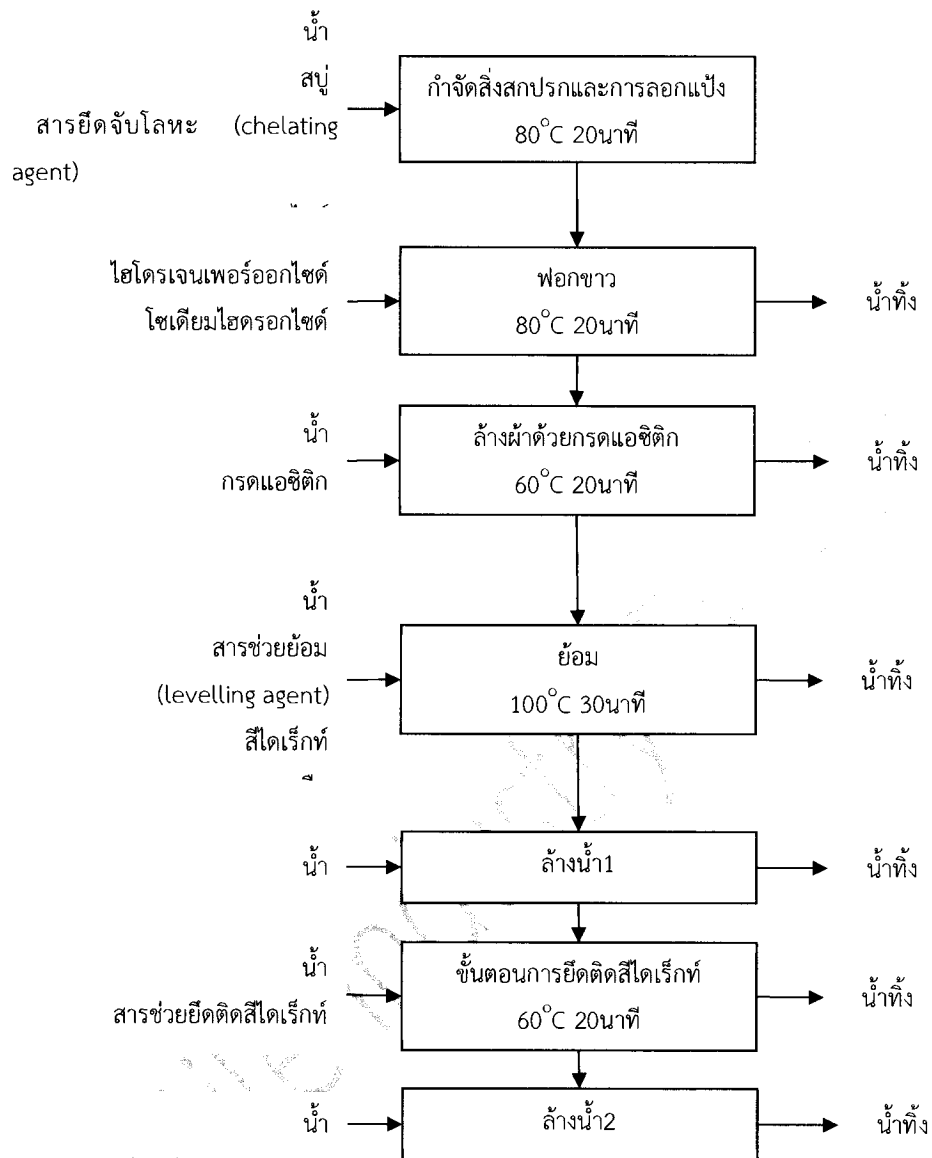
การตกแต่งกันหด วัตถุประสงค์หลักเพื่อไม่ให้ผ้าฝ้าย และผ้าฝ้ายผสมใยสังเคราะห์หดตัวขณะซัก

การตกแต่งด้วยเครื่องเสตนเตอร์ (stenter) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ โครงสร้างผ้าคงตัว โดยการควบคุมแรงดึง ทั้งตามความยาวและตามขวางของผ้า และจะถูกทำให้ยู่ตัวด้วยความร้อนขณะมีแรงดึง ความยาวผ้าถูกควบคุมโดยอัตราเร็วของผ้าที่ส่งเข้า ขณะที่ความกว้างควบคุมโดยจับผ้าบนโซ่ที่วิ่งขนานกัน การตกแต่งด้วยเครื่องเสตนเตอร์ เป็นกระบวนการที่สำคัญในการกำหนดความคงตัวของขนาดผืนผ้า และการหดตัวขณะใช้งาน

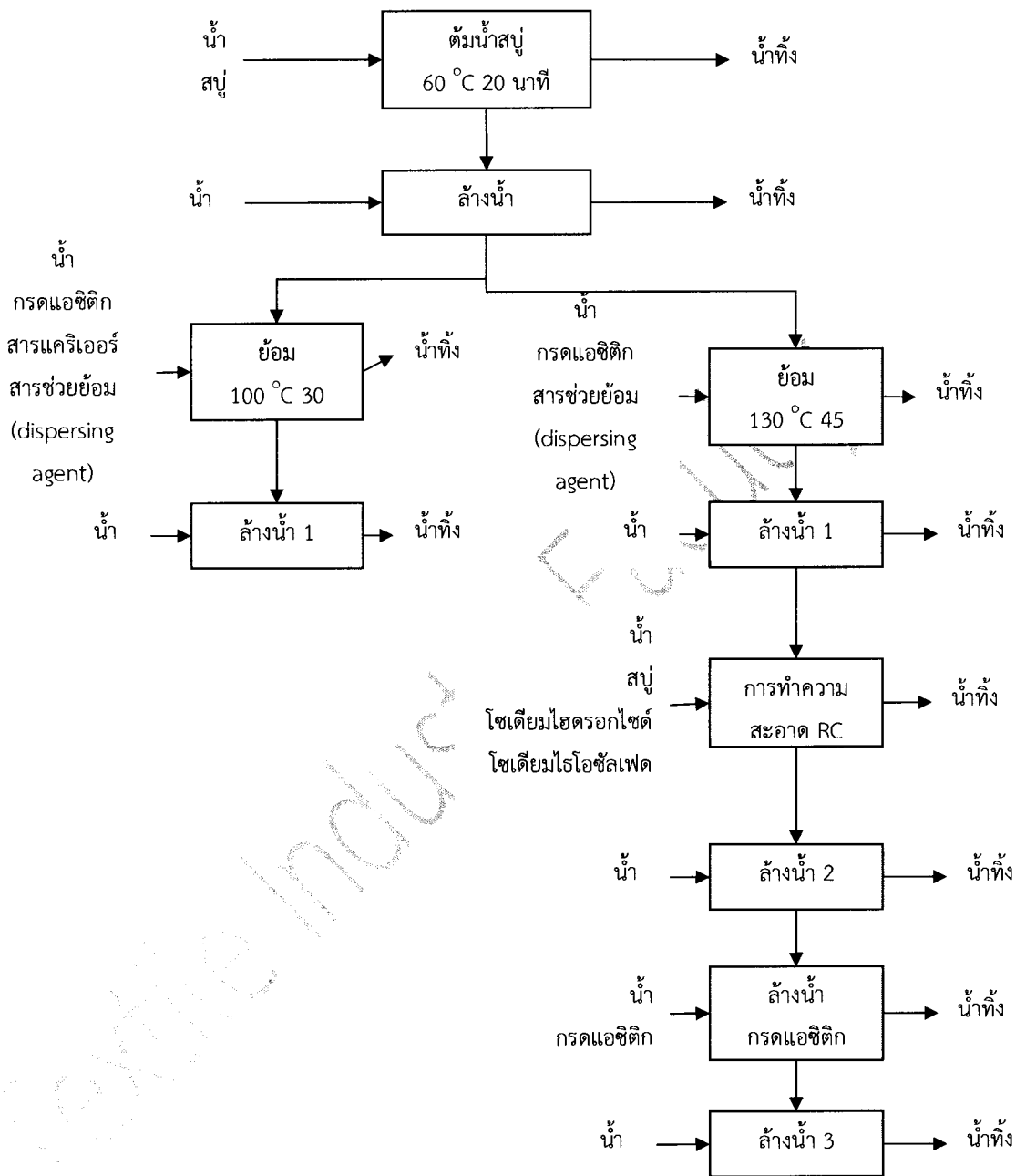
แผนผังกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมแสดงดังรูปที่ 4-6 รายละเอียดขั้นตอนการผลิตของแต่ละโรงงานอาจมีความแตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น รายละเอียดของผลิตภัณฑ์ มาตรฐานของสินค้า ความต้องการของลูกค้า ความต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการของผู้ผลิต



รูปที่ 4 แผนผังกระบวนการย้อมผืนผ้าไนลอน



รูปที่ 5 แผนผังกระบวนการฟอกย้อมผ้าฝ้าย 100%



รูปที่ 6 แผนผังกระบวนการฟอกผ้าพอลิเอสเตอร์

หมายเหตุ: การทำความสะอาด RC คือขั้นตอนการกำจัดโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่ผิวของเส้นใย

3. การใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อม

น้ำนับเป็นปัจจัยสำคัญของอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอในส่วนการฟอกย้อมเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี สีย้อม และน้ำเป็นตัวกลางตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า การย้อมสี การตกแต่งสำเร็จ และการชำระล้างทำความสะอาดผ้า/ด้าย เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆของแต่ละขั้นตอน นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำในหม้อไอน้ำ น้ำหล่อเย็น เนื่องจากน้ำมีบทบาทสำคัญต่อการฟอกย้อมเกือบทุกขั้นตอน ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในปริมาณมาก

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำใช้ในกระบวนการฟอกย้อมพิมพ์ผ้าฝ้าย

ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณน้ำใช้ (ลิตร/1000 กิโลกรัมของผลิตภัณฑ์)
การลงแป้ง (sizing)	500 - 8200
การลอกแป้ง (desizing)	2,500 - 21,000
การทำความสะอาด (scouring)	20,000 - 45,000
การฟอกขาว (bleaching)	2,500 - 25,000
การชุบมัน (mercerizing)	17,000 - 32,000
การย้อม (dyeing)	10,000 - 300,000
การพิมพ์ (printing)	8,000 - 1,6000

ที่มา : N. Manivasakarn., 1995; 11.

หมายเหตุ: ปริมาณน้ำใช้แต่ละโรงงานแตกต่างกันขึ้นกับกระบวนการและกำลังการผลิต

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำใช้ในกระบวนการฟอกย้อมพิมพ์ผ้าใยสังเคราะห์

ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณน้ำใช้ (ลิตร/1000 กิโลกรัมของผลิตภัณฑ์)				
	เรยอน	แอซีเทต	ไนลอน	อะคริลิก	พอลิเอสเตอร์
การทำความสะอาด (scouring)	17,000-34,000	25,000-84,000	50,000-67,000	50,000-67,000	25,000-42,000
การฟอกขาว (bleaching)	-	33,000-50,000	-	-	-
การย้อม (dyeing)	17,000-34,000	34,000-50,000	17,000-34,000	17,000-34,000	17,000-34,000
การตกแต่งสำเร็จ (finishing)	4,000-12,000	24,000-40,000	32,000-48,000	40,000-56,000	8,000-12,000

ที่มา : N.Manivasakarn., 1995: 11.

หมายเหตุ: ปริมาณน้ำใช้แต่ละโรงงานแตกต่างกันขึ้นกับกระบวนการและกำลังการผลิต

การใช้น้ำในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะใช้ในกระบวนการต่างๆ ดังนี้

(1) การใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อม

น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า การย้อม การตกแต่งสำเร็จ นอกจากการใช้น้ำเพื่อเป็นตัวกลางในการฟอกย้อมแล้ว ยังใช้น้ำเพื่อการล้างทำความสะอาดวัสดุที่ผ่านการฟอกย้อมก่อนนำเข้าสู่กระบวนการต่อไป ในกระบวนการล้างจะใช้น้ำประมาณ 60-70% ของปริมาณการใช้น้ำทั้งหมด (Swedish Environmental Protection Agency, 1989)

(2) การใช้น้ำในหม้อไอน้ำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่จะใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ไอน้ำนี้ถ้าเย็นตัวลงจะกลั่นตัวเป็นน้ำสะอาดที่สามารถนำกลับมาป้อนหม้อไอน้ำ (boiler) ได้

(3) การใช้น้ำในการหล่อเย็น

น้ำส่วนหนึ่งจะนำมาใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลงในระยะเวลาสั้น โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchange) น้ำหล่อเย็นเป็นน้ำที่สะอาด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

(4) การใช้น้ำในการทำสะอาดอุปกรณ์เครื่องจักร

น้ำใช้ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อย้อม ถังเตรียมสี เป็นต้น

(5) การใช้น้ำเพื่ออุปโภคบริโภค

ได้แก่การใช้น้ำในสำนักงาน โรงอาหาร ห้องน้ำ เป็นต้น

3.1 คุณภาพน้ำสำหรับกระบวนการฟอกย้อม

คุณภาพน้ำใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น การใช้น้ำผสมกับผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการบริโภค อาจใช้คุณภาพน้ำดื่มเป็นมาตรฐาน น้ำใช้ในการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบเป็นน้ำที่ผ่านการกรองทรายหรือฆ่าเชื้อโรค น้ำใช้ในการหล่อเย็นเป็นน้ำที่มีความกระด้างต่ำ น้ำใช้ในหม้อไอน้ำแรงดันสูง และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ต้องเป็นน้ำบริสุทธิ์ เป็นต้น ส่วนคุณภาพน้ำใช้ในกระบวนการทางเคมีสิ่งทอของแต่ละกระบวนการจะแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของเส้นใย กระบวนการ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่โดยทั่วไปต้องปราศจากคลอรีน หรือมีในปริมาณที่ต่ำมาก ปริมาณโลหะโดยเฉพาะเหล็ก และทองแดง เกลือในรูปของคลอไรด์ และซัลเฟต ควรมีในปริมาณที่ต่ำมาก ส่วนความเป็นด่าง ฟิเอช และสีของน้ำ ขึ้นกับชนิดของเส้นใย (Smith, 2003)

3.1.1 โลหะในน้ำ

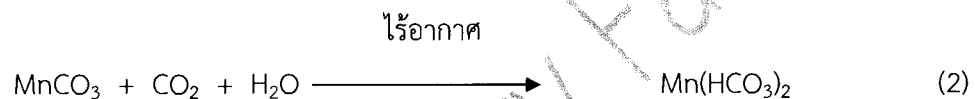
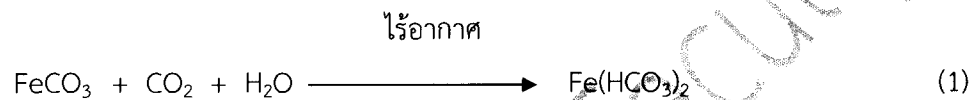
โลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำควรมีในปริมาณที่ต่ำมาก เช่น เหล็ก (Fe) 0.1 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แมงกานีส (Mn) 0.05 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียม (Mg) 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียม (Ca) 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมถึงโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรอยเปื้อนบนวัสดุ โดยเหล็ก และทองแดง เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการฟอกขาวเกินปกติ เกิดการทำลายเส้นใย และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีส เมื่อรวมตัวกับกรดไขมัน ทำให้เกิดเป็นคราบที่ติดแน่นกับผ้ากำจัดออกยาก ส่วนในกระบวนการฟอก เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ทำให้ความแข็งแรงของผ้าลดลง หรือสีอาจเปลี่ยนเป็นสีสนิม ในการย้อมสีเบสิกทำให้สีมืดได้ (N. Manivasakam., 1995: 21 - 30) ในน้ำส่วนใหญ่มีเหล็กมากกว่าแมงกานีส แต่เหล็กสามารถกำจัดออกไปได้ง่ายกว่า ด้วยการให้อากาศ (aeration) การตกตะกอน (precipitation) การกรอง (filtration) หรือโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

(1) เหล็ก และแมงกานีส (iron and manganese)

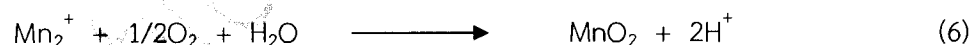
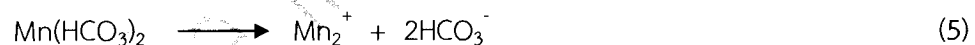
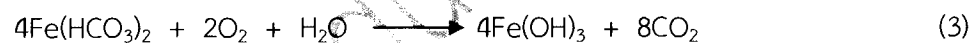
ปกติเหล็กในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน (น้ำบาดาล) อยู่ในสภาพของเกลิโอเฟอร์รัส (Fe^{2+}) หรือสารอินทรีย์เชิงซ้อน ในน้ำบาดาล เหล็กอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) และเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) ปริมาณเฟอร์รัสไอออนในน้ำบาดาลขึ้นกับการละลายของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ถ้าฟิเอชอยู่ระหว่าง 6 - 8 และมีไบคาร์บอเนตอยู่ด้วย พบว่ามีเฟอร์รัสไอออน 1 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าฟิเอชของน้ำบาดาลต่ำกว่า 3 เหล็กจะอยู่ในสภาพของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) นอกจากนี้เหล็กยังเกิดจากสนิมเหล็กในท่อ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีสนิม

สำหรับแมงกานีสไม่พบมากเหมือนเหล็ก ในน้ำบาดาลปกติมีอยู่น้อย หรือไม่มีเลย ถ้ามีจะอยู่ในรูปของ Mn^{2+} ที่เป็นเกลือของโลหะ หรือเป็นสารเชิงซ้อนที่ละลายอยู่ในน้ำ แต่ส่วนมากอยู่ในรูปคาร์บอเนต แมงกานีสในน้ำส่วนใหญ่มาจากชั้นหินชั้น หรือหินแปร ซึ่งพบในรูปของแมงกานีสออกไซด์คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์เมื่อมีสภาพรีดิวซ์เกิดขึ้น

เหล็ก และแมงกานีสในรูปที่ไม่ละลาย จะเปลี่ยนจากสภาพที่ไม่ละลายเป็นสภาพที่ละลายโดยมีวาเลนซ์เท่ากับสอง การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เพราะสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในดินเน่าสลายจึงต้องการออกซิเจน และปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดสภาพรีดิวซ์ เมื่อน้ำซึมผ่านดิน คาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกทำให้พีเอชลดลง ซึ่งช่วยเสริมสภาพรีดิวซ์ ถ้าน้ำไม่มีโอกาสสัมผัสกับอากาศ เหล็ก และแมงกานีสจะอยู่ในสภาพสารละลาย ดังสมการที่ 1-2



น้ำบาดาล เมื่อสูบขึ้นมาใช้ สัมผัสกับอากาศ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสดงในสมการที่ 3 - 6



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

(2) แคลเซียม (calcium)

แคลเซียมเป็นสาเหตุของความกระด้าง และการเกิดตะกอนในที่ต่าง ๆ ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในน้ำประปา คือ 75.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันสัน, 2538: 81)

(3) แมกนีเซียม (magnesium)

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

(4) ทองแดง (copper)

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

3.1.2 ความกระด้างของน้ำ (water hardness)

ความกระด้างของน้ำเป็นการวัดความสามารถของน้ำที่ตกตะกอนสบู่ เกิดจากธาตุที่มีประจุบวกสองขึ้นไปละลายเจือปนอยู่ในน้ำ ธาตุสำคัญที่ทำให้เกิดความกระด้างคือ แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) และอาจมีธาตุอื่น ๆ เช่น อะลูมิเนียม (Al^{3+}) เหล็ก (Fe^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) สตรอนเชียม (Sr^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) แต่เนื่องจาก แคลเซียม และแมกนีเซียม มีอยู่ในน้ำเป็นปริมาณมาก ดังนั้นจึงให้คำจำกัดความของความกระด้างของน้ำเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) อย่างไรก็ตาม ถ้าไอออนตัวอื่น ๆ ดังกล่าวข้างต้นมีอยู่ในน้ำเป็นจำนวนมากก็ต้องคิดรวมด้วย

ตารางที่ 5 ไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ

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

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

น้ำจากแหล่งต่าง ๆ มีความกระด้างไม่เท่ากัน โดยน้ำใต้ดินมีความกระด้างสูงกว่าน้ำผิวดิน ในการแบ่งความกระด้างของน้ำ อาจยึดถือหลักตามตารางที่ 5

ตารางที่ 6 ระดับความกระด้างของน้ำตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

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

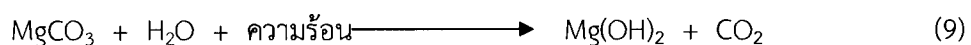
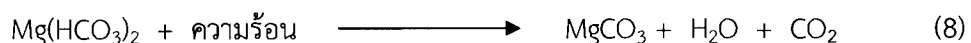
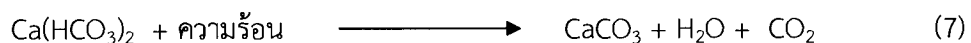
ที่มา : C.N. Sawyer, P.L. McCarty, and G.F. Perkin., 2003: 564.

ความกระด้างของน้ำในธรรมชาติ เกิดจากน้ำฝนที่ตกผ่านชั้นบรรยากาศ ละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนหนึ่งไว้ในน้ำ และเมื่อไหลผ่านชั้นดินซึ่งมีการเน่าสลายของพืชสีเขียวที่เกิดจากแบคทีเรียจะปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา และเมื่อแก๊สนี้ละลายในน้ำจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อนสลายตัวได้ง่าย

เมื่อน้ำซึมผ่านพื้นดินลงไป และผ่านชั้นหินที่ประกอบด้วย แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ง่าย แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ละลายน้ำได้บ้าง ส่วนแมกนีเซียม และแคลเซียมคาร์บอเนตละลายน้ำได้เล็กน้อย เมื่อน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ จะมีสมบัติที่ละลายหินปูน (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) เกิดเป็น แคลเซียมไบคาร์บอเนต ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) และ แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) ไบคาร์บอเนตเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักทำให้น้ำกระด้าง เพราะสารเหล่านี้ละลายน้ำได้ง่าย ความกระด้างในน้ำที่มีอยู่ทุกประเภทรวม เรียกว่าความกระด้างทั้งหมด (total hardness) อาจแบ่งชนิดของความกระด้างตามไอออนที่มีอยู่ในน้ำเป็น 2 ประเภทดังนี้

(1) ความกระด้างแบ่งตามไอออนลบ

ความกระด้างคาร์บอเนต หรือความกระด้างชั่วคราว (carbonate or temporary hardness) ได้แก่ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของความกระด้างโดยอยู่ในรูปของแคลเซียมไบคาร์บอเนต ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) เหตุที่เป็นความกระด้างชั่วคราว เพราะเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 54.5 องศาเซลเซียส ความกระด้างจะสลายตัวได้ดังนี้



จากสมการพบว่าปฏิกิริยาการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ถ้าเป็นหม้อไอน้ำ แก๊สนี้จะติดไปกับไอน้ำ และเมื่อไอน้ำกลั่นตัวควบแน่นเป็นน้ำ ทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดอ่อน ความกระด้างชั่วคราวนี้บางครั้งเรียกว่า ความกระด้างอัลคาไลน์ (alkaline hardness)

ความกระด้างที่ไม่ใช่คาร์บอเนตหรือความกระด้างถาวร (non-carbonate or permanent hardness) ได้แก่ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ คลอไรด์ (Cl^-) ในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของความกระด้าง โดยอยู่ในรูปของแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ไม่สามารถกำจัดได้โดยการต้ม ความกระด้างถาวรนี้อาจเรียกว่า ความกระด้างนอนอัลคาไลน์ (non-alkaline hardness)

(2) ความกระด้างแบ่งตามไอออนประจุบวก

ได้แก่ความกระด้างแคลเซียม (calcium hardness) และความกระด้างแมกนีเซียม (magnesium hardness) หรืออาจเป็นทั้งแคลเซียม และแมกนีเซียม

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโซเดียมที่มีมากในน้ำจะสามารถขัดขวางการเกิดฟองของสบู่ และทำให้น้ำมีรสกร่อย ซึ่งไม่จัดว่าเป็นความกระด้างที่แท้จริงเรียกว่า ความกระด้างเทียม (pseudo hardness)

ความกระด้างจากแคลเซียม และแมกนีเซียม จะทำปฏิกิริยากับสบู่ เกิดสบู่ของแคลเซียมและแมกนีเซียมเกาะติดผ้า และเครื่องจักร ทำให้วัสดุสิ่งทอต่าง หลังจากการย้อม การกำจัดความกระด้างโดยปกติมักทำในรูปของการแลกเปลี่ยนไอออน หรือใช้สารอีดีทีเอ จับแคลเซียม และแมกนีเซียมไว้

ตารางที่ 7 ผลของความกระด้างของน้ำต่อกระบวนการทางเคมีสิ่งทอ

กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ	ผลจากความกระด้างของน้ำ
การลอกแป้ง	ลดความสามารถการทำงานของเอนไซม์ (deactivate enzymes) ทำให้สารลงแป้ง (แป้ง, พีวีเอ) ตกตะกอน
การทำความสะอาด	ทำให้สบู่ตกตะกอน ทำให้เกิดคราบสีเหลืองบนผ้า ลดความสามารถในการดูดซึมน้ำของผ้า
การฟอกขาว	ทำให้สารฟอกขาวสลายตัว
การชุบมัน	ทำให้เกิดตะกอนของโลหะออกไซด์ ลดความสามารถในการดูดซึมน้ำ ลดความมันวาว
การย้อม	ทำให้สีไม่สม่ำเสมอ
การตกแต่งสำเร็จ	ทำให้เกิดตะกอนของโลหะออกไซด์ ลดความสามารถในการดูดซึมน้ำ ลดความมันวาว

3.2 คุณภาพของน้ำที่เหมาะสมในกระบวนการสิ่งทอ

น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญระบบหนึ่งของอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งมีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตของโรงงาน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบคุณภาพน้ำ เพื่อเป็นการเตรียมน้ำให้ตรงกับมาตรฐานการใช้งาน โดยคุณภาพน้ำใช้สำหรับกระบวนการทางสิ่งทอ แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณภาพน้ำใช้ในกระบวนการทางสิ่งทอ

พารามิเตอร์ของน้ำ	ค่าที่ยอมรับได้
ความขุ่น(turbidity)	< 5 เอ็นทียู
ของแข็งแขวนลอย(suspended solids)	< 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งทั้งหมด(total solids)	< 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
สี(color)	< 10 หน่วย
พีเอช(pH)	7 - 9
ค่าความเป็นกรด - ด่าง(acidity/alkalinity)	< 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต
ค่าความกระด้าง(hardness)	< 70 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต
เหล็ก(iron)	< 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส(manganese)	< 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง(copper)	< 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว(lead)	< 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
อะลูมิเนียม(aluminium)	< 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซิลิกา(silica)	< 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟต(sulphate)	< 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์(sulphide)	< 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอไรด์(chloride)	< 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์บอนไดออกไซด์(carbon dioxide)	< 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนเตรต(nitrate)	< 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอรีน(chlorine)	< 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
แอมโมเนีย(ammonia)	< 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไขมัน น้ำมัน(fat,oil,grease)	< 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : N.Manivasakarn., 1995: 35

หากคุณภาพน้ำใช้ไม่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนด เป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตได้ดังนี้

(1) การใช้น้ำในการผลิตหม้อไอน้ำ (boiler) ถ้าน้ำมีความกระด้าง ซึ่งมีสาเหตุจากเกลือของแคลเซียม และแมกนีเซียม เกลือเหล่านี้เมื่อถูกความร้อนจะเกิดการตกตะกอนเป็นตะกอนแข็งจับอยู่บริเวณพื้นผิวที่ให้ความร้อน ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อผลิตไอน้ำลดลง สิ้นเปลืองพลังงาน

(2) ในกระบวนการเตรียมผ้า น้ำกระด้างซึ่งมีไอออนของโลหะแคลเซียม หรือแมกนีเซียม เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผ้าอาจทำให้เกิดคราบขาวของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต สังเกตเห็นได้ยาก ทำให้บริเวณดังกล่าวไม่ดูดซึมน้ำ การดูดซึมเคมีต่าง ๆ ของผ้าจึงไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำผ้าไปย้อม ทำให้ย้อมสีได้ไม่สม่ำเสมอ (เกษม, 2537)

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

(4) ในกระบวนการซักล้างโดยใช้สบู่ (soap) ซึ่งเป็นสารซักล้าง (washing agent) ถ้าน้ำมีความกระด้างสูง ผลของการเป็นสารซักล้างจะลดลง เนื่องจากสบู่ทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะหนักในน้ำกระด้าง ทำให้เกิดสบู่ที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble soap) เกิดเป็นตะกอนติดบนผ้า ซึ่งมีผลในการนำไปย้อม โดยทำให้ผ้าที่ผ่านการย้อมแล้วมีความไม่สม่ำเสมอ ตลอดจนผิวสัมผัสของผ้าไม่ดี

(5) ในกระบวนการย้อม ถ้าน้ำมีปริมาณความกระด้าง เหล็ก และแมงกานีส เกินมาตรฐานจะมีผลต่อการย้อมสี กล่าวคือไอออนของโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (form complex) กับโมเลกุลสี ก่อนที่สีจะทำปฏิกิริยากับเส้นใย (color change) ทำให้สีกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นเม็ดสี หรือตะกอนสี ติดบนผ้าทำให้ผ้าเกิดรอยต่างเป็นจุดหรือคราบสี

4. ข้อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการย้อม

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดน้ำเสียมากที่สุดอุตสาหกรรมหนึ่ง โดยเฉพาะในขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้ เนื่องจากกระบวนการฟอกย้อมเป็นกระบวนการที่ต้องใช้น้ำในปริมาณมาก โดยเฉลี่ยแล้วในการผลิตผลิตภัณฑ์สิ่งทอน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ใช้น้ำประมาณ 95-400 กิโลกรัม ทั้งนี้ ขึ้นกับกระบวนการผลิต และประสิทธิภาพในการใช้น้ำของแต่ละโรงงาน (S. Barclay and C. Buckley, 2000) น้ำเสียส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต การล้าง และน้ำจากกระบวนการหล่อเย็น ยิ่งไปกว่านั้น อุตสาหกรรมสิ่งทอยังจำเป็นต้องใช้สารเคมีจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการต่าง ๆ มีการปนเปื้อนด้วยสีย้อม มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง สารเคมีหลายชนิด ได้แก่ ฟอर्मัลดีไฮด์ คลอรีน โลหะหนัก (ตะกั่วและปรอท) ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายยาก นอกจากนี้ น้ำที่ทิ้งยังมีอุณหภูมิและค่าพีเอชสูง ซึ่งหากไม่มีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมขึ้นได้

ในทางปฏิบัติ ปริมาณน้ำใช้และน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานแต่ละแห่งนั้น มีปริมาณไม่เท่ากัน สิ่งหนึ่งที่จำเป็นสำหรับการป้องกันมลพิษทางน้ำ คือ การประเมินการใช้น้ำ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความเป็นไปได้ หรือศักยภาพของการลดการใช้น้ำ รวมทั้งปริมาณน้ำเสียลง

ขั้นตอนแรกสำหรับการป้องกันมลพิษทางน้ำ คือ การตรวจประเมินถึงแหล่งที่มาและวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสิ่งทอ จากนั้นเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับค่าเฉลี่ยต่ำสุด เพื่อให้ทราบถึงเป้าหมายที่เป็นไปได้ของการลดปริมาณน้ำใช้และน้ำเสียที่เกิดขึ้น นอกจากนี้แล้ว ยังควรพิจารณาถึงน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานหรือข้อกำหนดของทางราชการ หรือก่อให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์หากสามารถลดหรือกำจัดได้

โดยทั่วไปแล้ว การบำบัดน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการที่ได้รับการพัฒนา และใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานาน เช่น ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) หรือระบบเติมอากาศ และระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมี เช่นการรวมตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) เป็นต้น

ในกระบวนการย้อมสีย้อมในสารละลายน้ำย้อมไม่เข้าไปติดในเส้นใยได้ทั้งหมด มีบางส่วนยังเหลืออยู่ในน้ำย้อมทั้งนี้ความสามารถในการติดสีขึ้นกับชนิดของสีย้อมและเส้นใย ตารางที่ 9 แสดงร้อยละของสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมหลังกระบวนการย้อม

ตารางที่ 9 ร้อยละของสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมหลังกระบวนการย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ

ชนิดของเส้นใย	ชนิดของสีย้อม	สีย้อมที่หลงเหลือในน้ำย้อม (%)
ขนสัตว์ และไนลอน	สีแอสด/สีรีแอคทีฟสำหรับย้อมขนสัตว์	7-20%
	Pre-metallised dyes	2-7%
	After chromes	1-2%
ฝ้าย และวิสโคส	สีเอโซอิก	5-10%
	สีรีแอคทีฟ	20-50%
	สีไดเร็กต์	5-20%
	พิกเมนต์	1%
	สีแวต	5-20%
	สีซัลเฟอร์	30-40%
	สีดิสเพอร์ส	8-20%
พอลิเอสเตอร์	สีเบสิก	2-3%
อะคริลิก	Spun dyed	N/A

ที่มา: Entec UK Ltd., 1997.

จากตารางพบว่าการย้อมฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ จะมีปริมาณของสีย้อมหลงเหลือในน้ำย้อมมากที่สุด และพบว่าปัญหาของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมาจากการย้อมฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ ส่วนการปนเปื้อนของโลหะหนักส่วนใหญ่จะมาจากการย้อมขนสัตว์

ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอขึ้นกับชนิดของเส้นใย และกระบวนการผลิต การประมาณลักษณะน้ำทิ้งในเบื้องต้นสังเกตได้จาก

- ปริมาณของสิ่งเจือปนที่ปนเปื้อนในเส้นใย
- ลักษณะของกระบวนการล้างผ้า เป็นแบบแบตช์ หรือล้างแบบต่อเนื่อง
- ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต
- ปริมาณน้ำใช้และอัตราการไหลของน้ำล้าง

ปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อลักษณะน้ำทิ้งคือ ปัจจัยด้านแฟชั่น การตลาด การเปลี่ยนแปลงฤดูกาล ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีและเฉดสี

ตารางที่ 10 ลักษณะของน้ำทิ้งจากการผลิตผ้าฝ้ายและเส้นด้าย

พารามิเตอร์	ผ้าทอ	ผ้าถัก	เส้นด้าย
บีโอดี (mg/L)	550-650	250-350	200-250
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	185-300	300	50-75
ซีโอดี (mg/L)	850-1200	850-1000	524-800
ซัลไฟด์ (mg/L)	3	0.2	0-0.09
สี (ADMI units)	325	400	600
พีเอช	7-11	6-9	7-12

ที่มา: Entec UK Ltd., 1997.

ตารางที่ 11 ลักษณะน้ำทิ้งจากขั้นตอนการผลิตต่างๆ ของโรงงานฟอกย้อม

ขั้นตอน	มลสารในน้ำทิ้ง	ลักษณะของน้ำทิ้ง
ลอกแป้ง	แป้ง กลูโคส คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไขมันและขี้ผึ้งธรรมชาติ หรือสังเคราะห์	บีโอดีสูง (35-50% ของทั้งหมด) ซีโอดีปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (DS)
การกำจัดสิ่งสกปรก	โซดาไฟ โซดาแอช โซเดียมซilikेट เศษเส้นใย สารลดแรงตึงผิว โซเดียมฟอสเฟต	ค่าความเป็นด่างสูง บีโอดีสูง (~30% ของทั้งหมด) ซีโอดีสูง ปริมาณของแข็งละลายน้ำ อุณหภูมิสูง
ฟอกขาว	ไฮโปคลอไรต์ คลอรีน โซดาไฟ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ กรด สารลดแรงตึงผิว โซเดียมซilikेट โซเดียมฟอสเฟต	ค่าความเป็นด่างสูง บีโอดี (~5% ของทั้งหมด) ปริมาณของแข็งแขวนลอย
ชุบมัน	โซดาไฟ	ค่าความเป็นด่างสูง (40-50g NaOH/l) บีโอดีต่ำ (<1% ของทั้งหมด) ซีโอดีต่ำ ปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง
ย้อมสี	สีย้อมชนิดต่าง ๆ สารรีดิวซิง สารมอร์แดนต์ กรดแอซิดิก สบู่	น้ำเสียมีสีเข้ม ซีโอดีสูง ปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำ ปริมาณของแข็งละลายน้ำ โลหะหนัก

ตารางที่ 11 ลักษณะน้ำทิ้งจากขั้นตอนการผลิตต่างๆ ของโรงงานฟอกย้อม (ต่อ)

ขั้นตอน	มลสารในน้ำทิ้ง	ลักษณะของน้ำทิ้ง
การพิมพ์	สี แป้งพิมพ์ กาว น้ำมัน สารมอดานต์ กรด สบู่	น้ำเสียสีเข้ม ซีโอดีสูง มีน้ำมัน ปริมาณของแข็งแขวนลอย
การตกแต่งสำเร็จ	เกลืออนินทรีย์ สารเคมีที่เป็นพิษ	เป็นด่างเล็กน้อย ซีโอดีขึ้นกับสารเคมีที่ใช้

ที่มา: S. Barclay and C. Buckley., 2000.

5. การวิเคราะห์ปัญหาและการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา

5.1 การวิเคราะห์สภาพปัญหา

เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงเปลี่ยนแปลงการดำเนินงานกิจกรรมของอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่สะอาด เพื่อลดการสูญเสียทรัพยากรน้ำและป้องกันปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม จำเป็นต้องตรวจสอบ และวิเคราะห์สภาพปัญหาที่ก่อให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรน้ำ และแหล่งกำเนิดน้ำเสียต่างๆ ในกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจาก 2 ส่วนดังนี้

5.1.1 การสำรวจกระบวนการผลิตและพฤติกรรมการทำงาน

การสำรวจกระบวนการผลิตและพฤติกรรมการทำงาน โดยการเดินสำรวจกระบวนการผลิต เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการรับวัตถุดิบจนถึงการบรรจุ และจัดส่งสินค้าและผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้าจะทำให้พบจุดรั่วไหล การสูญเสีย รวมถึงพฤติกรรมการทำงานที่อาจมีส่วนทำให้เกิดการสูญเสียดังกล่าว ในระหว่างการสำรวจควรสังเกตและจดบันทึก สิ่งที่พบเห็นตั้งแต่การใช้วัตถุดิบ น้ำ เชื้อเพลิง พลังงาน ไฟฟ้าอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ไม่ประหยัด และเป็นสาเหตุของการสูญเสียทรัพยากรต่างๆ ไปโดยเปล่าประโยชน์

5.1.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดำเนินงาน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดำเนินงานอาศัยการเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้วัตถุดิบ น้ำ เชื้อเพลิง ไฟฟ้า ไอน้ำ ปริมาณการผลิต ของเสีย และน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อม เพื่อนำมาคิดเปรียบเทียบกับปริมาณวัตถุดิบ หรือปริมาณผลิตภัณฑ์ เพื่อบ่งชี้สถานการณ์การดำเนินงาน และทราบประสิทธิภาพการดำเนินงานว่ามีการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า หรือมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด เพื่อให้สามารถหาทางปรับปรุงเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิต หรือขั้นตอนการทำงาน ตลอดจน

เครื่องจักรและอุปกรณ์ให้สามารถลดปริมาณการสูญเสียและการใช้ทรัพยากรต่างๆ ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับตัวชี้วัดประสิทธิภาพการดำเนินงานของการฟอกย้อม ได้แก่

- ปริมาณการใช้น้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (ลิตรต่อกิโลกรัมผ้า)
- ปริมาณน้ำเสียต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (ลิตรต่อกิโลกรัมผ้า)
- ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมผ้า)
- ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (ลิตรต่อกิโลกรัมผ้า)
- อัตราร้อยละของการย้อมซ้ำของปริมาณการผลิตทั้งหมด

ค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการดำเนินงานจากการใช้ทรัพยากรต่างๆ ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะปริมาณการใช้น้ำและสารเคมี เนื่องจากอัตราส่วนของน้ำต่อวัตถุดิบที่ใช้แตกต่างกันตามประเภทของชนิดผ้า ความเข้มข้นของสีย้อม และลักษณะเครื่องจักรที่ใช้แต่ละโรงงาน และเนื่องจากการผลิตของโรงงานฟอกย้อมในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นไปตามความต้องการของลูกค้า (make to order) จึงทำให้มีการแปรปรวนเกิดขึ้นในแต่ละรอบการผลิตของแต่ละโรงงาน

5.2 การจัดลำดับความสำคัญของปัญหา

จากการเก็บข้อมูล และนำข้อมูลมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงตัวชี้วัด หรือข้อมูลการผลิตตามช่วงเวลา ขั้นตอนต่อมาคือการนำประเด็นปัญหาที่พบมาจัดลำดับความสำคัญของปัญหา และหาแนวทางการผลิตที่สะอาด โดยคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ตัวอย่างเช่น

- กฎ ระเบียบ และข้อบังคับ
- นโยบายด้านสิ่งแวดล้อมของบริษัท
- ผลกระทบด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย
- ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติ
- ความยากง่ายในการแก้ปัญหา
- การยอมรับจากผู้อื่นโดยเฉพาะผู้ปฏิบัติ

การจัดเรียงลำดับความสำคัญของประเด็นปัญหา อาจใช้การพิจารณาตัดสินใจของทีมงาน หรือใช้วิธีการให้คะแนนโดยพิจารณาครอบคลุมถึงความเป็นไปได้ทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

6. แนวทางปฏิบัติที่ดีในการใช้ทรัพยากรน้ำและลดมลพิษทางด้าน สำหรับอุตสาหกรรมฟอก ย้อม

6.1 การจัดเก็บข้อมูล หรือการจัดหาข้อมูลของโรงงาน

โรงงานควรมีการจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบเพื่อหาประสิทธิภาพในการดำเนินงาน โดยมีแนวทางปฏิบัติดังนี้

- ให้ทุกหน่วยงานหรือบุคลากรทุกคนบันทึกรายละเอียดของงานที่ทำในแต่ละวัน
- ข้อมูลสำคัญที่โรงงานควรจัดเก็บประจำ คือ ปริมาณการใช้สารเคมี สีย้อม น้ำ พลังงาน รวมทั้งปัญหาอุสรรคอื่นที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ
- การเปรียบเทียบการใช้น้ำและพลังงานในการผลิตต่อจำนวนผลผลิตที่ทำได้
- เก็บข้อมูลอัตราการดูดซับสารละลายตกแต่งสำเร็จของผ้าแต่ละประเภท เพื่อให้สามารถเตรียมสารละลายได้ในปริมาณที่เหมาะสม
- จัดให้มีวิธีการปฏิบัติงาน (work instruction) ในแต่ละขั้นตอนการผลิตไว้ในสายการผลิต (production line) อย่างชัดเจน

6.2 การควบคุมคุณภาพและการจัดการผลิต

- จัดฝึกอบรมให้ผู้ปฏิบัติงานใหม่/ผู้ควบคุมเครื่องใหม่ ให้ควบคุมเครื่องอย่างถูกต้อง และแนะนำให้ใช้วัสดุอย่างเกิดประโยชน์สูงสุด
- ประยุกต์ใช้หลักการควบคุมคุณภาพให้มีความเข้มงวดมากขึ้น และตรวจสอบทุกขั้นตอนของการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จแล้วต้องมีการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องเพื่อลดความเสี่ยงของการตัดสินใจกลับ (return to manufacturer, RtM)
- สร้างแรงจูงใจให้พนักงานช่วยในการลดของเสียด้วยการฝึกอบรม

6.3 การใช้วัตถุดับ

แนวปฏิบัติที่ดีด้านการใช้วัตถุดับในกระบวนการฟอกย้อม จะให้ความสำคัญที่การลดปริมาณการใช้สี และสารเคมี โดยควบคุมปริมาณการใช้ที่เหมาะสม ปรับเปลี่ยนใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า ซึ่งนอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายแล้วยังช่วยลดปริมาณการใช้น้ำ ลดปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียที่จะต้องนำไปบำบัด โดยมีแนวปฏิบัติที่ดีดังนี้

- เลือกใช้สารเคมีในการลอกแบ่งให้เหมาะสมกับชนิดของแบ่ง เช่นการใช้เอ็นไซม์แอลฟาอะไมเลส ในการลอกแบ่งธรรมชาติ
- เลือกใช้โซดาแอชแทนโซดาไฟในขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรก เนื่องจากโซดาไฟมีความเป็นด่างสูงและล้างออกยาก
- ใช้น้ำร้อนในการล้างสีส่วนเกินและสารช่วยย้อมออกจากผ้า เพื่อลดการใช้สารลดแรงตึงผิวในขั้นตอนการล้างผ้า ใช้สารลดแรงตึงผิวในขั้นตอนการล้างผ้าเฉพาะผ้าที่มีสมบัติไม่ทนความร้อน
- ควรแยกเครื่องเฉพาะสำหรับการตกแต่งนุ่มเพื่อให้สามารถนำสารละลายสารตกแต่งนุ่มที่ใช้แล้วกลับมาใช้ซ้ำ
- เก็บรักษาสารละลายตกแต่งสำเร็จที่เหลือไว้ในถัง ปิดฝาและเก็บในที่เย็น หากต้องตกแต่งสำเร็จด้วยสูตรเดิมภายใน 2-3 วัน
- ใช้สีย้อมที่มีอัตราการดูดติดสีในเส้นใยสูง
- เลือกใช้สีย้อมที่มีพิษน้อยและสามารถบำบัดได้ง่ายหากติดไปกับน้ำเสีย
- เลือกใช้สารซักล้างสังเคราะห์ (synthetic detergents) แทนการใช้สบู่
- ใช้แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate) แทนการใช้กรดแอสติคในการปรับพีเอชของการย้อมสีดีสเพิร์ส และการพิมพ์ฟักมันต์
- ควบคุมปริมาณการใช้สารเคมีอย่างถูกต้อง

7. แนวปฏิบัติที่ดีการใช้น้ำ

แนวปฏิบัติที่ดีด้านการใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อมจะเน้นที่การลดปริมาณการใช้ ซึ่งเป็นแนวปฏิบัติที่เป็นไปได้ทางเทคนิคมากที่สุด เนื่องจากน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกระบวนการฟอกย้อมแล้ว จะมีการปนเปื้อนของสีและสารเคมี ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ซ้ำ หรือนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้น เพื่อให้การใช้น้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณการใช้น้ำและปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น สามารถทำได้ดังนี้

- ติดตั้งมาตรวัดน้ำ และตัวควบคุมระดับน้ำ ในบริเวณหรือตำแหน่งที่ต้องใช้น้ำ
- ตรวจสอบและซ่อมแซมรอยรั่ว หรือการชำรุดของท่อน้ำ วาล์วและอุปกรณ์การใช้น้ำต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ
- การติดตั้งหัวฉีดควบคุมการจ่ายน้ำที่ปลายสายยางในการล้างทำความสะอาด
- ติดตั้งอุปกรณ์อัตโนมัติ ควบคุมการไหลของน้ำในท่อ
- ติดตั้งหัวฉีดน้ำแรงดันสูงสำหรับการทำความสะอาด
- ไม่ใช้ระบบน้ำล้น (over flow) ในการล้างผ้า ควรใช้การแช่ หรือระบบล้างแบบไหลสวนทาง
- พยายามลดการย้อมซ้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสิ้นเปลืองน้ำ สีย้อม พลังงานและสารเคมี
- ใช้เครื่องวัดสีคอมพิวเตอร์ (computer color matching:CCM) ช่วยเทียบสีได้อย่างถูกต้องเพื่อควบคุมการออกสูตรสีย้อมได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
- ชั่ง ตวง สี และสารเคมีด้วยความระมัดระวังเพื่อลดการตกหล่นและรั่วไหล
- นำน้ำจากอ่างล้างสุดท้ายที่สะอาดที่สุดกลับมาใช้ซ้ำ

7.1 การประหยัดน้ำในกระบวนการเตรียม

กระบวนการเตรียมผ้า เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตได้จากการฟอกย้อมและการตกแต่งสำเร็จ เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้าให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี

ในกระบวนการเตรียมขั้นตอนที่ใช้น้ำมากที่สุดคือการล้าง ซึ่งขั้นตอนการล้างในกระบวนการเตรียมสิ่งทอ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือการล้างด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่อง (continuous system) และการล้างด้วยกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง (batchwise system) เนื่องจากกระบวนการล้างแบบต่อเนื่องจะใช้น้ำ พลังงาน และสารเคมีน้อยกว่ากระบวนการแบบชุด ดังนั้นในการล้างผ้าหากเป็นไปได้ควรเลือกใช้กระบวนการล้างผ้าแบบต่อเนื่องมากกว่าแบบชุด

(1) ขั้นตอนการลอกแป้ง

- ล้างผ้าด้วยน้ำร้อนก่อนจุ่มอัดผ้าด้วยน้ำยาลอกแป้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลอกแป้ง

(2) ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาว

- ลดสิ่งเจือปนที่อยู่ในวัตถุดิบ เพื่อลดปริมาณน้ำที่ใช้ล้าง
- นำน้ำจากการล้างในขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรก (scouring) ไปใช้ใหม่ในกระบวนการลอกแป้ง และนำน้ำล้างจากกระบวนการฟอกขาวไปใช้ใหม่ในกระบวนการกำจัดสิ่งสกปรก
- นำน้ำล้างสุดท้ายของกระบวนการชุบมันซึ่งมักมีความเข้มข้นของโซดาไฟสูงถึง 3-5% กลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการกำจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาวเส้นใยฝ้ายและเส้นใยผสม

7.2 การประหยัดน้ำในกระบวนการย้อม

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่ต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งาน ด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) จะให้สีบนผ้าผืนหรือเส้นด้ายที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

- ติดตั้งอุปกรณ์การควบคุมการจ่ายหยุดจ่ายน้ำอัตโนมัติสำหรับเครื่องจักรย้อม
- การนำน้ำหล่อเย็น (cooling water) ที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ในหม้อย้อม เพื่อประหยัดน้ำ และพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำ
- นำน้ำล้างสุดท้ายกลับไปใช้เป็นน้ำแรกในกระบวนการย้อมสี
- นำน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกลับไปใช้เป็นน้ำล้างสุดท้ายในกระบวนการย้อมสี
- การมีระบบควบคุมการผลิตเป็นอย่างดี เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการย้อม

- วางแผนการย้อมโดยเริ่มต้นย้อมจากเฉดสีอ่อนก่อนแล้วจึงย้อมสีเข้มปานกลาง และเฉดสีเข้มตามลำดับ เพื่อลดขั้นตอนการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร
- ปรับเปลี่ยนเครื่องจักรที่ต้องใช้อัตราส่วนวัสดุต่อน้ำ (L:R) สูง มาใช้เครื่องที่มีอัตราส่วนวัสดุต่อน้ำ (L:R) ต่ำ
- กำจัดน้ำออกจากวัสดุ (ผ้าหรือด้าย) ก่อนนำวัสดุนั้นไปผ่านกระบวนการต่อไป เช่น สลัดน้ำออกจากผ้าที่ย้อมสีก่อนนำผ้าไปล้าง
- ในกระบวนการฟอกย้อมโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิสูง ในภาวะที่มีความดัน ให้ตรวจเช็คภาวะการทำงานของเครื่องจักรให้เหมาะสมและถูกต้องกับสภาวะการย้อม
- การลดการย้อมซ้ำ

7.3 การประหยัดน้ำในกระบวนการล้าง

ขั้นตอนที่ใช้น้ำมากที่สุดในกระบวนการผลิต ได้แก่ ขั้นตอนการล้างน้ำ โดยมีแนวปฏิบัติในการประหยัดน้ำในขั้นตอนการล้าง ดังนี้

- การติดตั้งวาล์วควบคุมการจ่ายน้ำเข้าสู่เครื่องที่ทอส่งน้ำหลัก
- การใช้เครื่องล้างที่มีอ่างล้างหลาย ๆ อ่าง
- การใช้ระบบการล้างแบบน้ำวิ่งสวนทางผ้า (counter flow)
- การลดปริมาณน้ำหรือสารละลายที่คงค้างอยู่ในผ้า (carry over) ในกรณีของกระบวนการแบบต่อเนื่อง ควรตรวจสอบสภาพลูกกลิ้งรีดน้ำ (squeezing mangles) เช่น ความแข็งแรงของยาง สภาพของไดอะแฟรม (diaphragm) ในกรณีของกระบวนการแบบชุด เช่น การใช้เครื่องเจ็ต การลดปริมาณน้ำ หรือสารเคมีคงค้างในผ้าสามารถทำได้โดยการทิ้งระยะเวลาเพื่อให้น้ำที่คงค้างอยู่ในผ้าไหลออกมาภายหลังการระบายน้ำออกจากเครื่อง หากพนักงานเติมน้ำเข้าสู่เครื่องก่อนที่จะให้น้ำสีไหลทิ้งจากผ้าจนหมด การล้างผ้าจะไม่ให้ผลดีเท่าที่ควร และควรหลีกเลี่ยงการล้างผ้าด้วยระบบน้ำล้น
- การนำระบบการตรวจสอบความสะอาดของน้ำ และความสัมพันธ์ระหว่างความสะอาดของน้ำและปริมาณน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบมาใช้
- การจัดเตรียมระบบรวบรวมน้ำเสียไว้รองรับระบบการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (water reuse and recycling system) โดยการจัดทำรางระบายน้ำเสียแยกระหว่างน้ำ

เสียที่มีความสกปรกมาก (เช่นน้ำย้อมสี น้ำล้างครั้งแรกๆของการย้อม) ออกจากน้ำเสียที่มีความสกปรกหรือมีการปนเปื้อนน้อย (เช่นน้ำล้าง น้ำในกระบวนการฟอกขาว)

- หลีกเลี่ยงการใช้ระบบน้ำล้น (over flow) สิ่งที่มีกพบในโรงย้อม คือ การใช้ระบบน้ำล้น (over flow) ในการล้างผ้า ถึงแม้จะใช้เครื่องเจ็ตในการล้างก็ตาม พนักงานก็มักปล่อยให้ น้ำไหลล้นอย่างต่อเนื่อง ควรลดปริมาณน้ำไหลล้น หรือเปลี่ยนมาใช้ระบบการล้างแบบเป็นขั้นตอน (stepwise rinsing)
- การปรับปริมาณน้ำและจำนวนครั้งที่ใช้ล้างอย่างเหมาะสม
- การนำน้ำล้างที่สะอาดที่สุดกลับมาใช้ใหม่
- หลีกเลี่ยงหรือลดปริมาณการใช้สารทำความสะอาด (detergent) ในขั้นตอนการกำจัดสี ส่วนเกินหลังการย้อมสีรีแอคทีฟ โดยใช้การล้างด้วยน้ำร้อน หรือน้ำอุ่นแทน

7.4 การประหยัดในขั้นตอนการพิมพ์

- ลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างสายพาน สกรีน ตัวปาดสกรีน และถัง และพยายามนำ น้ำ ล้างดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่
- เลือกใช้พิกเมนต์ที่ละลายในน้ำ (water based pigments) แทนการใช้พิกเมนต์ ที่อยู่ในรูปอิมัลชันของน้ำและน้ำมัน (water-in-oil emulsions) หากไม่สามารถทำได้ให้ แยกบำบัดน้ำทิ้งจากขั้นตอนนี้

7.5 การประหยัดน้ำในหม้อต้มไอน้ำ

โรงงานฟอกย้อมทุกโรงจะต้องมีหม้อต้มไอน้ำ เพื่อใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งหม้อต้มไอน้ำ ส่วนใหญ่ทำงาน 24 ชั่วโมงทุกวัน การประหยัดน้ำในหม้อต้มไอน้ำ จะพิจารณาประเด็นที่เกี่ยวข้องดังนี้

- นำระบบควบคุมปริมาณของแข็งละลายน้ำมาควบคุมระยะเวลาและจำนวนครั้งในการระบาย ไอน้ำ (blow down)
- นำน้ำควบแน่นหรือน้ำคอนเดนเสต (condensate water) ที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ป้อนหม้อ ไอน้ำใหม่ ช่วยประหยัดน้ำและพลังงาน

7.6 การประหยัดน้ำในระบบหล่อเย็น/ลดอุณหภูมิ

โรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่มักติดตั้งระบบการหล่อเย็น หรือลดอุณหภูมิ ระบบนี้อาจไม่ได้เปิดใช้งานตลอดเวลา แต่น้ำที่เข้าสู่ระบบจะต้องเป็นน้ำที่สะอาด ภายหลังการหล่อเย็นน้ำควรนำไปใช้ต่อได้อีกในกระบวนการอื่น เนื่องจากเป็นน้ำสะอาด และพบว่าการนำน้ำหล่อเย็นกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตสามารถประหยัดน้ำในกระบวนการผลิตได้ถึงร้อยละ 10 (G. Ganiaris, and J. Okun. 2001.)

กระบวนการที่ต้องการหล่อเย็นหรือลดอุณหภูมิได้แก่

- กระบวนการเผาขน
- การอบแห้งหลังการย้อม โดยใช้อินฟราเรดเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน
- การอบแห้งหลังการพิมพ์
- ลูกกลิ้งรีดอัดมัน (calendar roller)
- เครื่องแซนโฟไรซ์ (sanforized machine)

ตารางที่ 11 การปฏิบัติที่ดีในการใช้น้ำ

การปฏิบัติ	การประหยัดน้ำ (ตัน/ตัน ผ้า)	ร้อยละของการประหยัดน้ำ
การตรวจสอบรอยรั่ว การบำรุงรักษา, การทำความสะอาด	4-7.6	2-5%
การนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่		
จากการเผาขน (singeing)	3.2-7.4	2-5%
จากระบบอัดอากาศ (air compressor)	3.89	2%
จากกระบวนการทำให้ผ้าหดตัว (preshrink)	1.44	1%
การนำน้ำ condensate กลับมาใช้ใหม่	3.8-6.0	2-3%
การนำน้ำจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่		
จากกระบวนการฟอกขาว (bleaching)	6.47	4%
จากกระบวนการชุบมัน	4.54	3%

ที่มา: Natural Resources Defense Council, 2010.

8. การลดน้ำเสียในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นถ้าโรงงานสามารถลดปริมาณน้ำเสีย และสามารถนำน้ำเสียส่วนหนึ่งกลับมาใช้ในการกระบวนการที่เหมาะสม จะช่วยลดค่าใช้จ่าย เพิ่มกำไร ลดพลังงานที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งทำให้ช่วยลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโรงงานได้

8.1 แนวทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการจัดการน้ำเสีย

แนวทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการจัดการน้ำเสีย คือการลดปริมาณน้ำเสีย ซึ่งมีข้อดีดังนี้

- ลดปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัด
- ลดค่าใช้จ่ายในการรวบรวมน้ำเสีย
- ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด

8.1.1 แนวทางการลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

- ลดจำนวนการล้างในการผลิต และใช้น้ำร้อนในการล้าง
- น้ำที่ผ่านการล้างในครั้งถัดๆ มา สามารถนำกลับไปใช้ในการล้างครั้งแรกๆ ได้
- รมัถระวังการสูญเสียน้ำโดยการรั่วไหลของน้ำ
- ใช้เครื่องจักรที่มีอัตราส่วนการใช้น้ำต่อวัสดุสิ่งทอในอัตราต่ำ (low-bath-ratio dyeing machines)
- ควบคุมปริมาณการใช้สารเคมีอย่างเหมาะสมกับแต่ละกระบวนการผลิต
- การเพิ่มประสิทธิภาพของสูตรย้อม (recipe optimization) โดยใช้สัดส่วนของสารเคมีให้เหมาะสม ไม่ใช้ปริมาณสารเคมีมากเกินไปจนความจำเป็น เพราะสารเคมีส่วนเกิน นอกจากทำให้สิ้นเปลืองแล้ว ยังทำให้น้ำทิ้งมีความสกปรกมากขึ้นด้วย
- เลือกใช้ระบบการล้างแบบสวนทาง
- การย้อมด้วยวิธี pad-batch dyeing เป็นการย้อมเย็น และส่วนใหญ่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส เป็นกระบวนการที่ช่วยลดภาวะมลพิษ ลดการใช้พลังงาน และลดค่าใช้จ่ายในส่วนของสีย้อม สารเคมี แรงงาน และน้ำใช้

8.1.2 แนวทางในการลดความสกปรกของน้ำ

(1) การลดความเข้มข้นของน้ำเสียโดยการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่

- การนำโซดาไฟ (caustic soda) จากขั้นตอนการล้างในกระบวนการชุบมัน (mecerising wash water) โดยการระเหย เพื่อเพิ่มความเข้มข้น
- นำสารลงแบ่งสังเคราะห์จากกระบวนการลอกแบ่ง กลับมาใช้ใหม่

(2) การลดความเข้มข้นของน้ำเสียโดยการเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสม

- เลือกใช้สารเคมีที่มีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า
- เลือกใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) แทนแบ่งและเจลาติน ในการลงแบ่งเส้นด้ายยืน ซึ่งค่าบีโอดีของซีเอ็มซี และพีวีเอ มีค่าบีโอดีต่ำกว่าแบ่งและเจลาตินมาก
- ใช้สารซักล้างสังเคราะห์ (synthetic detergent) แทนการใช้สบู่
- เลือกใช้สีย้อมที่มีความสามารถติดสีกับเส้นใยได้ดี มีความเป็นพิษต่ำ และไม่มีส่วนผสมของโลหะ
- ใช้วิธีการลอกแบ่งด้วยเอนไซม์ แทนการใช้สารลอกแบ่งประเภทสารออกซิไดซ์
- เปลี่ยนสารที่ใช้ในกระบวนการกำจัดแบ่ง เป็นเอนไซม์ที่เปลี่ยนแบ่งเป็นแอลกอฮอล์ หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- เลือกใช้สารเคมีในการลอกแบ่งให้เหมาะสมกับชนิดของแบ่ง เช่นการใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในการลอกแบ่งธรรมชาติ
- หลีกเลี่ยงการสะเทินวัสดุให้เป็นกลางด้วยกรดภายหลังการย้อมสีรีแอคทีฟ โดยใช้การล้างด้วยน้ำแทน แต่หากไม่สามารถทำได้ให้ใช้กรดฟอร์มิก หรือกรดอื่นแทนอะซิดิก เพื่อลดปริมาณ TOC ในน้ำทิ้ง
- การตรวจเช็คสารเคมี (pre-screen chemicals) สารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ในกระบวนการผลิต มีค่าบีโอดี ซีโอดี ค่าความเป็นพิษ แตกต่างกัน ตลอดจนข้อมูลถึงผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งศึกษาได้จากเอกสารกำกับของสารเคมีนั้น (safety data sheet, SDS)
- เลือกใช้สารซักล้าง (detergent) ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หลีกเลี่ยงการใช้สารซักล้างที่มีส่วนผสมของ linear alkylbenzenesulphonate, nonylphenoethoxylate,

dialkyldimethyl ammoniumchloride, distearyl dimethyl ammonium chloride, dimethyl ammonium chloride, sulphosuccinates, alkylphenolethoxylates, และสารประกอบเชิงซ้อนที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก (เช่น EDTA, phosphonic acid, NTA, phosphonates)

- ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกระบวนการฟอกขาว โดยหลีกเลี่ยงการใช้สารคลอไรด์ และไฮโปคลอไรด์
- ใช้กรดฟอร์มิก (formic acid) หรือกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง แทนกรดแอซิดิก ในขั้นตอนการปรับสภาพให้เป็นกลางหลังการย้อม

8.2 วิธีกำจัดสีจากน้ำเสียโรงฟอกย้อม

การกำจัดสีจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากเดิมซึ่งโรงงานทั่วไปมักใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยในสมัยก่อนสีที่ปล่อยออกมา มีปริมาณน้อย ทำให้ยังไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เพิ่มจำนวนมากขึ้น อีกทั้งยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟอกย้อม ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรที่ทันสมัย การเติมสารเคมีช่วยเพิ่มคุณภาพของผ้า จนกระทั่งการพัฒนาสีที่ใช้ในการย้อม เพื่อให้สีติดผ้ามากขึ้น ทำให้น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ประกอบด้วยสารเคมีและสีย้อมมากมายหลายชนิด จนไม่สามารถใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพชนิดตะกอนเร่ง (activated sludge) ในการกำจัดสีให้ลดลงได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับวิธีการกำจัดสีหลายวิธี การเลือกวิธีการกำจัดสีหนึ่งวิธีหรือมากกว่า ขึ้นกับขั้นตอนในการฟอกย้อม และชนิดสีที่ใช้โดยจำแนกวิธีการกำจัดสีได้ ดังนี้

8.2.1 การกำจัดสีทางเคมี-ฟิสิกส์

การกำจัดสีโดยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์เป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองต่อไป หรืออาจใช้ตามหลังกระบวนการชีวภาพ ตัวอย่างของการกำจัดสีโดยวิธีเคมี-ฟิสิกส์ ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารเคมีซึ่งสามารถกำจัดสีอินทรีย์ และสารประกอบอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกของกระบวนการดังกล่าว เกิดจากอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนถูกดูดติดผิว ฟล็อก โรงฟอกย้อมส่วนมากนิยมใช้สารเคมีต่างๆ ในการทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน และฟล็อกกูเลชัน ได้แก่ ปูนขาว สารส้ม เหลือเฟอริก หรือพอลิอิเล็กโทรไลต์ แล้วตามด้วยกระบวนการตกตะกอน ซึ่งพบว่ามีข้อเสีย เนื่องจากใช้สารเคมีปริมาณมากในการกำจัดสี และมีสไลด์ทางเคมีเกิดขึ้นมากตามมาด้วย ดังนั้นการใช้วิธีการโคแอกกูเลชัน และฟล็อกกูเลชัน ในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงฟอกย้อม ข้อ

สำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ การประเมินปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ ให้มีปริมาณพอเหมาะกับลักษณะของน้ำเสีย

8.2.2 กระบวนการทางเคมี

(1) การออกซิเดชัน (oxidation)

การเติมคลอรีน (chlorination)

สีย้อมหลายชนิดถูกกำจัดได้โดยใช้สารเคมีเป็นตัวออกซิไดซ์ สารเคมีที่นิยมใช้มากในการกำจัดสีขั้นต้นคือ คลอรีนในรูปของเหลวหรือแก๊ส อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้คลอรีนในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในรูปสารประกอบคลอรีน จากงานวิจัยของ Ghosh และคณะ (1978) อ้างโดย Reife และ Freeman (1996) ในการกำจัดสีโดยกระบวนการเติมคลอรีน สรุปได้ว่าต้องใช้คลอรีนปริมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจะให้ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีร้อยละ 77 แต่จะมีคลอรีนตกค้างในน้ำเสียปริมาณ 110 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ้าใช้คลอรีนต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีคลอรีนตกค้างเหลืออยู่ แต่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเหลือร้อยละ 57

การเติมโอโซน (ozonation)

โอโซนได้ถูกใช้ในการกำจัดกลิ่นในน้ำดื่ม ตลอดจนใช้ในการย่อยสลายสารประกอบสี โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ดีกว่าคลอรีน และพบว่ากลไกที่ได้จากกระบวนการออกซิไดซ์น้ำเสียที่มีสีโดยใช้โอโซน ไม่ก่อให้เกิดมลพิษจากสารพวอินทรีย์ที่มีคลอรีน ในการวิจัยของ Horning (1978) พบว่า การใช้โอโซนปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวออกซิไดซ์ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ และ สีเบสิก แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีดิสเพอร์ส ส่วนการกำจัดสีไดเรกต์ ต้องใช้โอโซนในปริมาณที่ไม่แน่นอน และนอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งอุปกรณ์

(2) การรีดักชัน (reduction)

ในการศึกษาเกี่ยวกับการรีดักชันของสีชนิดเอโซ (azo) ด้วยโซเดียมไฮไดรอกไซด์ พบว่าสีเอโซจะถูกสลายให้กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง เกิดเป็นสารประกอบแอมโรแมติกเอมีน ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นดังกล่าว พบว่า หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะเป็นพิษมากกว่าตัวของสีย้อมเอง (Reife และ Freeman, 1996)

(3) กระบวนการดูดติดผิว

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทั้งต่ำๆ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งสามารถเตรียมได้จาก ลิกไนต์ ถ่านหิน เศษไม้ เศษฝ้าย กะลามะพร้าว ฯลฯ ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีพื้นที่ผิว 500 - 1400 ตารางเมตรต่อกรัม

(Reife และ Freeman , 1996) โดยพบว่าโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม มีผลต่อปริมาณการดูดติดผิวบน ผงถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการดูดติดผิวของสารประกอบจะเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขนาดของโมเลกุล ความเป็นสารประกอบแอโรแมติก (aromaticity) ความมีขั้ว (polarity) และการแตกพันธะลูกโซ่ของคาร์บอน (carbon chain balancing)

(4) กระบวนการไฟฟ้าเคมี

สถาบัน ADMI ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงฟอกย้อมโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า นอกจากจะสามารถกำจัดโลหะหนักแล้ว ยังสามารถกำจัดสีให้ลดลงได้อีกด้วย จึงทำให้มีการใช้เทคโนโลยีไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมเป็นครั้งแรก และมีการจดลิขสิทธิ์ โดยใช้ชื่อว่า Andco Environmental Process (Uhrich ,1989) โดย Carneiro, P.A., Fugivara, C.S., Nogueira, F.P. , Boralle, N., and Zanoni, V.B. (2003) ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมแอคทีฟ (Reactive Blue 4 Dye) ระหว่างกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ SnO_2 อิเล็กโทรด และกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเพนตอน ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลต ผลการทดลองรายงานไว้ว่า เมื่อใช้ SnO_2 อิเล็กโทรด สามารถลดค่าทีโอซี (TOC) ลงได้ร้อยละ 58 และกำจัดสีจากน้ำเสียได้ทั้งหมด และเมื่อใช้การออกซิเดชันด้วยสารเพนตอน ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลต พบว่าสามารถลดค่าทีโอซี (TOC) ลงได้ร้อยละ 80 และกำจัดสีจากน้ำเสียได้ทั้งหมด และจากรายงานผลการวิจัยในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสิ่งทอ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมีตามด้วยกระบวนการกรองของ Chen, X., Shen, Z., Zhu, X., Fan, Y., and Wang, W. (2005) ผลการทดลองพบว่า การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการลดค่าซีไอดี (ร้อยละ 89.8) และหลังจากผ่านกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนพบว่าสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยลงได้เกือบทั้งหมด ลดค่าความขุ่นลงได้ร้อยละ 93.3 และน้ำที่ผ่านการกรองสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกในกระบวนการผลิต

8.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีการแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (anaerobic treatment system)
- ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ (aerobic treatment system)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไร้อากาศ เป็นวิธีที่ไม่ต้องเติมออกซิเจนหรือถังหมัก ระบบนี้เริ่มนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และยังได้พลังงานที่เกิดจากระบบไร้ออกซิเจน ได้แก่ แก๊สมีเทน เป็นต้น ซึ่งเป็นแก๊สที่ใช้ในการหุงต้มทำอาหารได้ และใช้ในการต้มน้ำในหม้อต้มน้ำของ โรงงานอุตสาหกรรมได้ ในอดีตเข้าใจกันว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไร้อากาศ

จำเป็นต้องมีน้ำเสียที่มีความสกปรกมาก แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบของถังปฏิกริยาขึ้นมาเรื่อยๆ จนสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีบีโอดีต่ำๆ เช่น น้ำเสียจากชุมชน เป็นต้น

อื่นๆ

นอกจากกระบวนการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีกระบวนการกำจัดสีโดยอาศัยเทคโนโลยีใหม่ ๆ อีก เช่นกระบวนการออสโมซิสผันกลับ การกรองโดยผ่านแสงยูวี การแลกเปลี่ยนไอออน โดยจะใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นของสีสูง และน้ำที่ได้จากการบำบัดด้วยกระบวนการดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ยังไม่เป็นวิธีที่แพร่หลายนัก เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาอุปกรณ์สูงมาก

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน.
- กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2547. คู่มือเทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โปรเซสคัลเลอร์ ดีไซน์ แอนด์ พรินติ้ง.
- เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล. 2537. การควบคุมคุณภาพงานเตรียมสิ่งทอเพื่อการย้อม พิมพ์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ประชาชน.
- ณรงค์ วุทธิเสถียร. 2540. การปรับสภาพน้ำใช้อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สมาคมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2541. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- C. B. Smith. 2003. Identification and Reduction of Pollution Sources in Textile Wet Processing. Department of Textile Chemistry. North Carolina State University.
- C.N. Sawyer., P.L. McCarty., and G.F. Perkin. 2003. Chemistry for environmental engineering and science. 5th. U.S.A.: Mc Graw-Hill.
- Carneiro, P.A., Fugivara, C.S., Nogueira, F.P., Boralle, N. and Zanoni, V.B. 2003. A Comparative on chemical and electrochemical degradation of reactive blue 4 Dye. Portugaliae Electrochimica Acta. 21:49-67
- Chen, X. , Shen, Z. , Zhu, X. , Fan, Y. , and Wang, W. 2005. Advanced treatment of textile wastewater for reuse using electrochemical oxidation and membrane filtration. water SA. 31(1).
- D.T. Parkers. 2005. Critical Success Factors in Improving Dyehouse Productivity. Dye house solution International. Conference, Istanbul May 2005.
- Environmental Protection Authority. 1998. Environmental Guidelines for The Textile Dyeing and Finishing Industry. Environmental Protection Authority State Government of Victoria. <http://www.epa.vic.gov.au>.
- Entec UK Ltd. 1997. Water and Chemical Use in the Textile Dyeing and Finishing Industry. <http://www.etsu.com/ETEPP/>

- G. Ganiaris, and J. Okun. 2001. A Best-Practices Guide for Textile and Apparel Manufacturers. U.S. EPA Region2.
- Horning, R.H. 1978. Textile Dyeing Wastewater-Characterization End Treatment. U.S.Environmental Protection Agency. EPA-600/2-78-098. Washington, D.C.
- J.E. Mock., and H.T. Jennings. 1996. Water Quality and Laundry Problem. North Carolina Extension Service. <http://www.bae.ncsu.edu>.
- J.N. Eetters and M.D. Hurwitz. 1986. Opaque Reflectance of Translucent Fabric. Textile Chemist and Colorist. 18(6): 19-26.
- J. Shore. 1995. Cellulosic Dyeing. Oxford: The Alden Press.
- Jr., F. W. Billmeyer, and M. Saltzman. 1981. Principles of Color Technology. 2nd Edition. New York: Wiley.
- J.W. Rucker., and C.B. Smith. 1995. Trouble Shooting in Preparation Asystematic Approach. Textile Chemistry Department. North Carolina State University: Raleigh, North Carolina.
- K. Hunger. 2003. Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- K.W. Yueng., and S.M. Shang. 1999. The Influence of metal ions on the Aggregation and Hudrophobicity of Dyes in Solutions. Coloration Technology. 115(7-8): 228-232.
- N.Manivasakam. 1995. Water used in textile processing. Coimbature : Scroll EPD.
- Natural Resources Defense Council. 2010. NRDC's Ten Best Practices for Textile Mills to Save Money and Reduce Pollution. [www. Nrdc.org/cleanbydesign](http://www.Nrdc.org/cleanbydesign).
- Reife , A., and Freeman , H.S. 1966. Environmental Chemistry of Dyes and Pigments. U.S.,John Wiley & Sons, Inc.
- S. Barclay and C. Buckley. 2000. Waste Minimisation Guide for the Textile Industry; A Step Towards Cleaner Production (Volume1). University of Natal Durban South Africa.

Swedish Environmental Protection Agency. 1989. The Textile Industry Fact Sheet.
Report No. 071-SNV/Br SNV 20610.

Uhrich, K.D. 1989. Method for removing dyestuffs from wastewater. Inventor, Andco
Environmental Process. U.S. Pat.4,880, 510. Nov.14.