

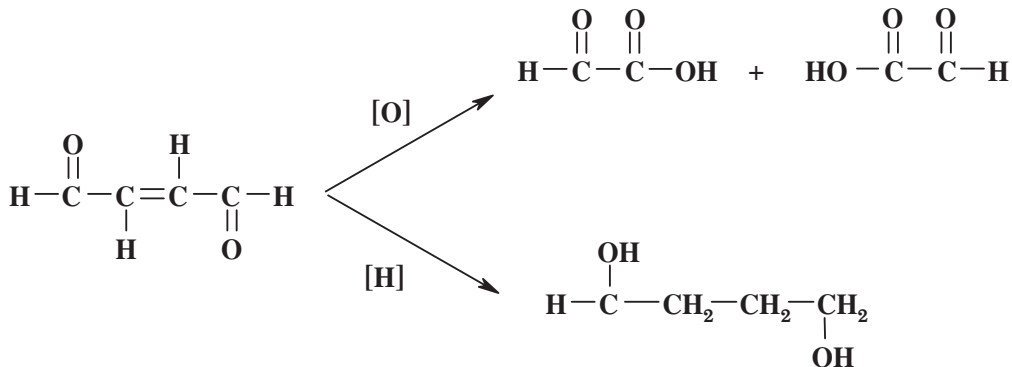
## บทความรับเชิญ

# การใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารฟอก (ขาว) ผ้าฝ้าย

พรทิพย์ แซ่เบ้\*

สารที่มีสีตามธรรมชาติเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่อยู่ในเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เส้นใยขนสัตว์ เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติจึงมีสีออกไปทางเหลือง น้ำตาล หรือสีเทา ซึ่งความเข้มอ่อนของเฉดสีขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ภูมิอากาศ และภูมิประเทศในการเพาะปลูก หรือการเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้เส้นใย ทำให้ในกระบวนการเตรียมวัสดุสิ่งทอ เช่น ผ้า หรือเส้นด้าย ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการย้อม บางครั้งจำเป็นต้องฟอกขาวเส้นใยเพื่อให้ได้เฉดสีการย้อมที่ต้องการ โดยเฉพาะการย้อมผ้าสีอ่อนๆ

วัตถุประสงค์ของการฟอกขาว (bleaching) คือ การกำจัดสีที่มีอยู่ในเส้นใยธรรมชาติเพื่อให้เส้นใยดูขาวขึ้น ในสมัยโบราณนิยมฟอกผ้าขนสัตว์โดยการนำผ้าไปอิงกับไอของซัลเฟอร์แล้วไปตาก แต่ในปัจจุบันนิยมใช้สารเคมีช่วยในการฟอกขาวผ้า เพราะนอกจากจะให้ค่าความขาวที่สูงขึ้นยังเพิ่มประสิทธิภาพการฟอกขาว ทำให้ผลิตได้เร็วขึ้น การฟอกขาวมีความจำเป็นสำหรับผ้าขาวหรือเส้นด้ายที่จะนำมาผลิตเป็นผ้าขาว หรือสำหรับการย้อมผ้าหรือเส้นด้ายสีอ่อน เพื่อให้ได้ความขาวและเฉดสีที่ต้องการ



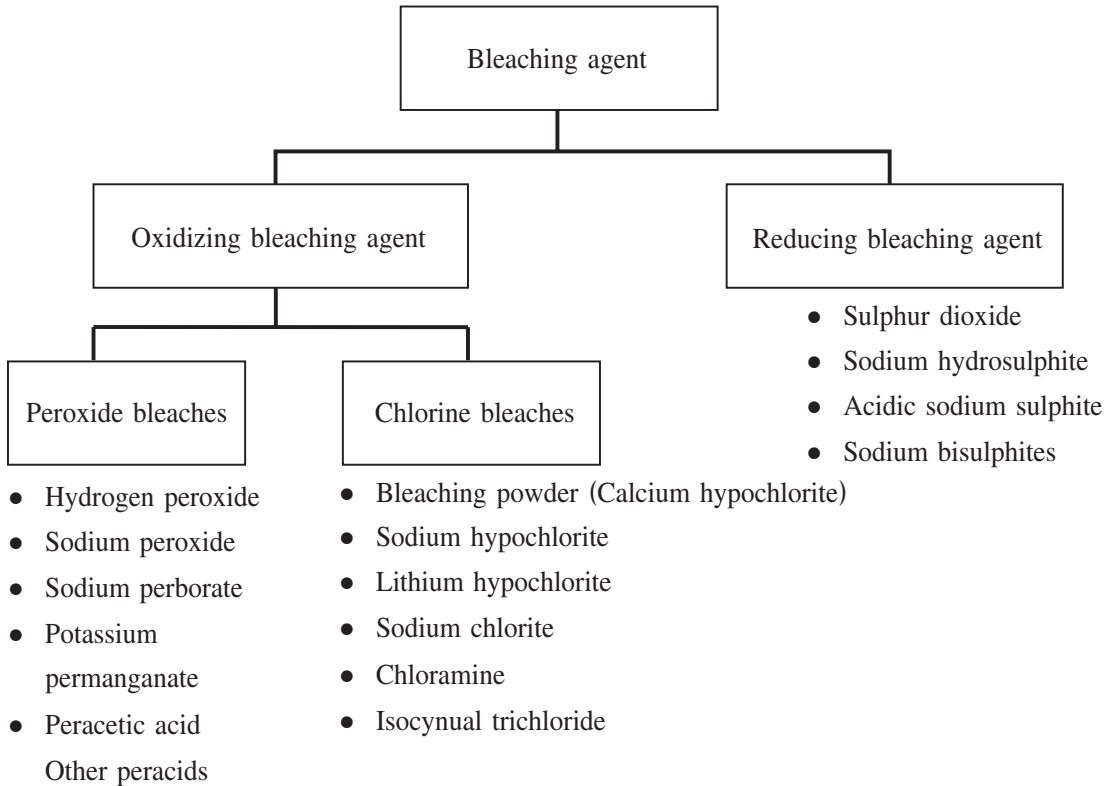
รูปที่ 1 แสดงกระบวนการฟอกขาวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน [O] และรีดักชัน [H]

สารที่มีสี (chromophores) โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระภายในโมเลกุลจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบสี ทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆ การฟอกขาวเป็นกระบวนการที่ทำลายพันธะคู่ในโมเลกุลของสารที่มีสีให้กลายเป็นพันธะเดี่ยวโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน (oxidation and reduction reaction) เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระภายในโมเลกุลจึงเกิดเป็นโมเลกุลของสารที่ไม่มีสี (รูปที่ 1) สารที่นิยมใช้สำหรับการฟอกขาวผ้ามีหลายชนิด แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สารรีดิวซ์ (reducing bleaching agent) และสารออกซิไดซ์ (oxidizing bleaching agents) ดังรูปที่ 2 ในอุตสาหกรรมนิยมใช้สารออกซิไดซ์มากกว่าสารรีดิวซ์ เพราะผ้าที่ผ่านการฟอกด้วยสารรีดิวซ์ให้ผลการฟอกที่ไม่ถาวร เมื่อผ้าสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ตามธรรมชาติก็จะมีโอกาสที่กลับมาเกิดสีได้อีก ความขาวจึงลดลง

ปัจจัยหลักในการเลือกชนิดของสารฟอกขาวในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยที่จะทำการฟอก ราคา ความง่ายในการใช้งาน รวมถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้กับเครื่องจักรที่มีในโรงงาน [1] ในบทความนี้จะขอกล่าวถึงสารฟอกขาวที่นิยมใช้กับผ้าฝ้าย เนื่องจากผ้าฝ้ายสวมใส่สบาย จึงนิยมนำมาตัดเย็บใส่เสื้อผ้า และจากรายงานมูลค่าการส่งออกสินค้าเครื่องนุ่งห่มไทยไปยังตลาดโลก ประจำเดือน มกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 พบว่ามูลค่าการส่งออกเสื้อผ้าสำเร็จรูปทั้งหมดของประเทศไทย 41% ผลิตจากผ้าฝ้าย [2] ดังนั้นในกระบวนการผลิตผ้าฝ้ายเพื่อนำไปตัดเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูปจึงต้องการความหลากหลายของเมล็ดสีเพื่อให้ก้าวทันต่อตลาดแฟชั่น ทำให้มีสีย้อมจำนวนมากที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายหรือผ้าฝ้าย กระบวนการฟอกขาวเป็นกระบวนการที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าฝ้ายในเมล็ดสีอ่อน รวมถึงผลิตภัณฑ์ผ้าขาว ผ้าฝ้ายที่จะเข้าสู่กระบวนการย้อมในเมล็ดสีอ่อนจะต้องมีระดับความขาวอยู่ในเกณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อเมล็ดสีที่ต้องการบนผ้าฝ้ายน้อยที่สุด

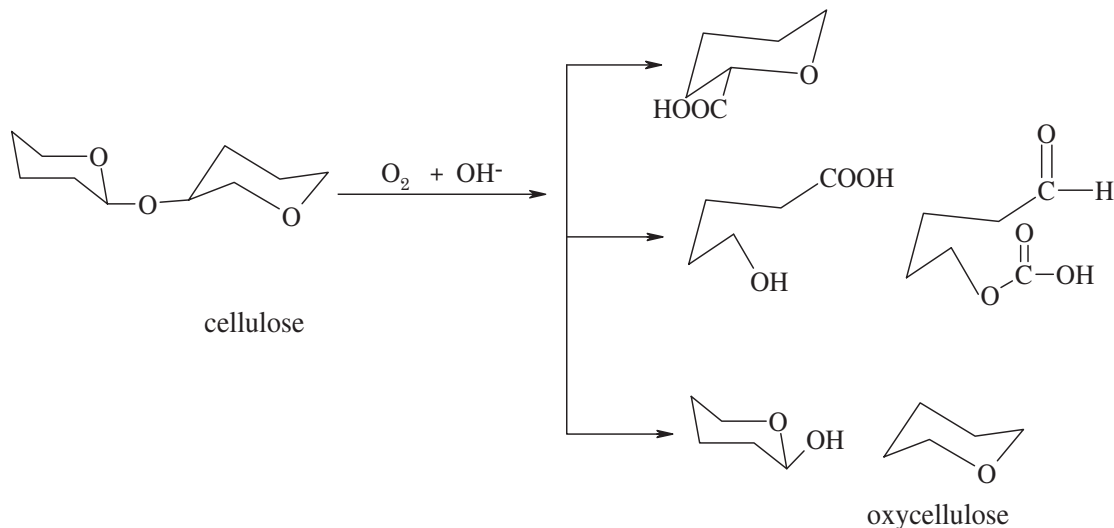
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [3, 4]

Constituents	Composition of fiber (%owf)
- Cellulose (fiber)	88.0-96.0
- Impurities in cotton fiber	4.0-12.0
- Protein	1.0-1.9
- Wax	0.4-1.2
- Ash (inorganic salts)	0.7-1.6
- Pectin	0.4-1.2
- Others (resins, pigment, hemicelluloses)	0.5-0.8



รูปที่ 2 แสดงชนิดของสารฟอกขาวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีสารที่มีสีอยู่ประมาณ 0.5-0.8% ของน้ำหนักเส้นใยทั้งหมด ดังตารางที่ 1 สีธรรมชาติของฝ้ายแบ่งเป็นสีที่ละลายน้ำซึ่งสามารถกำจัดออกได้ด้วยการต้มในน้ำเดือด และสีที่ไม่ละลายน้ำที่ต้องถูกกำจัดด้วยสารฟอกขาว โดยชนิดของสารฟอกขาวผ้าฝ้ายมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดเป็นชนิดของสารออกซิไดซ์ 2 ชนิดด้วยกัน คือ สารฟอกขาวที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (โซเดียมไฮโปคลอไรท์; NaOCl) และผงฟอกขาว (แคลเซียมไฮโปคลอไรท์; Calcium hypochlorite) สารฟอกอีกชนิดหนึ่งเป็นชนิดที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ และพบว่าในปัจจุบันประมาณ 90% ใช้ในการฟอกผ้าฝ้าย คือ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide;  $H_2O_2$ ) ในกระบวนการฟอกขาวฝ้ายนั้นนอกจากจะทำหน้าที่ทำลายโครงสร้างสีธรรมชาติของเส้นใยฝ้ายทำให้ผ้าฝ้ายขาวขึ้นแล้วยังช่วยกำจัดสิ่งสกปรกที่เป็นจุดดำ (motes) บนเส้นใยฝ้ายด้วย แต่สิ่งที่ควรระวังในการฟอกขาวเส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยฝ้ายด้วยสารออกซิไดซ์ คือ ความแข็งแรงของผ้า ภายหลังจากกระบวนการฟอกขาวจะลดลง เนื่องจากสารฟอกขาวจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเส้นใยเซลลูโลสเกิดเป็น oxycellulose ซึ่งสารออกซิไดซ์จะเข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง  $\beta$ -1,4 glycosidic ในโมเลกุลของเซลลูโลสแล้วทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง ความแข็งแรงของเส้นใยจึงลดลง ดังรูปที่ 3 ซึ่งตามมาตรฐานทั่วไป ความแข็งแรงของผ้าภายหลังจากฟอกไม่ควรต่ำกว่า 70% ของความแข็งแรงเดิม และผ้าที่ผ่านการฟอกต้องมีความขาวอยู่ระหว่าง 72 ถึง 80



รูปที่ 3 แสดงปฏิกิริยาการเกิด oxycellulose

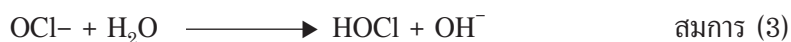
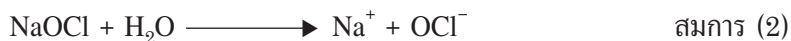
### โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl)

โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (หรือ chlorox<sup>®</sup>) เป็นสารละลายฟอกขาวที่เก่าแก่และทุกคนคุ้นเคยดี เนื่องจากสารฟอกประเภทนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาฟอกขาวได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ฟอกขาวผ้าที่ใช้ตามบ้านได้ เช่น ผลิตภัณฑ์ฟอกขาว “ไฮเตอร์” แต่ประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ใช้ตามบ้าน (5% active chlorine) น้อยกว่าประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (12-15% active chlorine) ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ปัจจุบันในอเมริกามีการใช้สารโซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการฟอกผ้าฝ้ายอยู่ประมาณ 10% ของการใช้งานทั้งหมด [5]

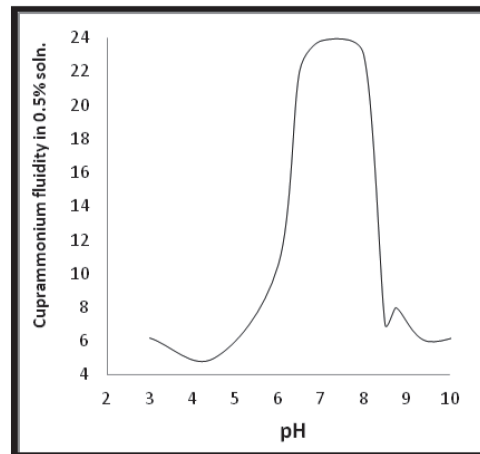
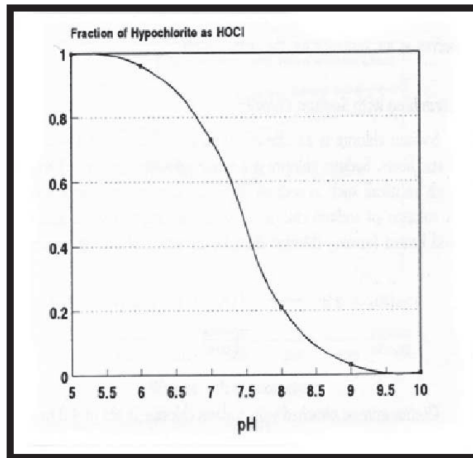
โซเดียมไฮโปคลอไรท์สังเคราะห์จากการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ภายใต้ภาวะที่มีก๊าซคลอรีน ดังสมการ (1) หรือเตรียมจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยขั้วแคโทด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และคลอรีนอยู่ที่ขั้วแอโนด



โซเดียมไฮโปคลอไรท์เป็นเกลือของกรดไฮโปคลอรัส (hypochlorous acid; HClO) กระบวนการฟอกผ้าฝ้ายด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ต้องทำในภาวะที่เป็นด่าง โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) เป็นตัวปรับ pH ซึ่งจะทำให้เกิดกรดไฮโปคลอรัสซึ่งทำหน้าที่เป็นสารฟอกขาว (bleaching agent) ดังสมการ 2 และ 3



สิ่งที่ต้องระวังในการฟอกขาวผ้าด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ คือ ค่า pH ในกระบวนการฟอกต้องเหมาะสม คือ อยู่ในช่วง pH 9-10 เพื่อในกระบวนการฟอกมีประสิทธิภาพสูงสุด และเกิด oxycellulose ในการทำลายความแข็งแรงของฝ้ายน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4



(ก) ผลของค่า pH ต่อการสลายตัวของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ และให้กรดไฮโปคลอรัส [6]

(ข) ผลของค่า pH ต่อความแข็งแรงของฝ้ายที่ถูกฟอกด้วย NaOCl 3 g/l 5 ชม. [7]

**รูปที่ 4** (ก) แสดงผลของ pH ต่อการแตกตัวเป็นกรดไฮโปคลอรัส และความแข็งแรงของฝ้ายที่ฟอกด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

(ข) ผลของค่า pH ต่อความแข็งแรงของฝ้ายที่ถูกฟอกด้วย NaOCl 3 g/l 5 ชม. [7]

จากรูปที่ 4 พบว่าที่ pH มากกว่า 10 จะไม่เกิดกรดไฮโปคลอรัสซึ่งทำหน้าที่เป็นสารฟอกขาว (bleaching agent) ดังนั้นจึงไม่เกิดปฏิกิริยาการฟอกผ้า

ที่ pH น้อยกว่า 5 กรดไฮโปคลอรัสจะเกิดปฏิกิริยากับคลอโรอินอิสระแล้วทำให้เกิดคลอโรอินซึ่งไม่ละลายน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพการฟอกลดลง (active chlorine ลดลง) ดังสมการ (4)



ที่ pH 5-10 จะเกิดกรดไฮโปคลอรัสซึ่งทำหน้าที่เป็นสารฟอกขาว (bleaching agent) ดังสมการ (5) มากขึ้น เนื่องจากสมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวา แต่ยิ่งภาวะที่มีความเป็นกรด (pH 5) จะทำให้เกิดกรดไฮโปคลอรัสปริมาณมาก ทำให้ควบคุมปฏิกิริยายากกว่าในภาวะที่เป็นเบส (ที่ pH 9) กรดไฮโปคลอรัสที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของเซลลูโลสที่ตำแหน่ง  $\beta$ -1,4 glycosidic จึงทำให้สายโซ่มอเลกุลเซลลูโลสสั้นลง ความแข็งแรงของผ้าฝ้ายจึงลดลง ดังรูป 4(ข) ซึ่งตามมาตรฐาน AATCC Test method 82-2001 [8] ผ้าที่ผ่านการฟอกแล้วควรจะมีค่า Cuprammonium hydroxide fluidity (CUAM) อยู่ในช่วง 3.0-7.0 (ผ้าฝ้ายดิบมีค่าอยู่ในช่วง 1.0-2.0) ที่ pH 7 มีค่า CUAM สูงสุด แสดงว่าทำให้ฝ้ายสูญเสียความแข็งแรงมากที่สุด



ดังนั้น pH ที่เหมาะสมในการฟอกผ้าฝ้ายควรจะอยู่ระหว่างช่วง 9-10 ถึงแม้ว่าจะเกิดกรดไฮโปคลอรัสเพียงเล็กน้อยแต่สามารถควบคุมปฏิกิริยาการฟอกผ้าได้ง่ายกว่า ทำให้ความแข็งแรงของผ้าฝ้ายลดลงไม่มากนัก (รูปที่ 4 (ข)) และผ้าที่ผ่านการฟอกเมื่อนำมาวัดค่าความแข็งแรง ผลการทดลองที่ได้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน AATCC Test method 82-2001 [8] (อยู่ในช่วง 3.0-7.0)

ภาวะในการฟอกผ้าฝ้ายด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

NaOCl 2.5% active chlorine

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 1.0% pH buffer

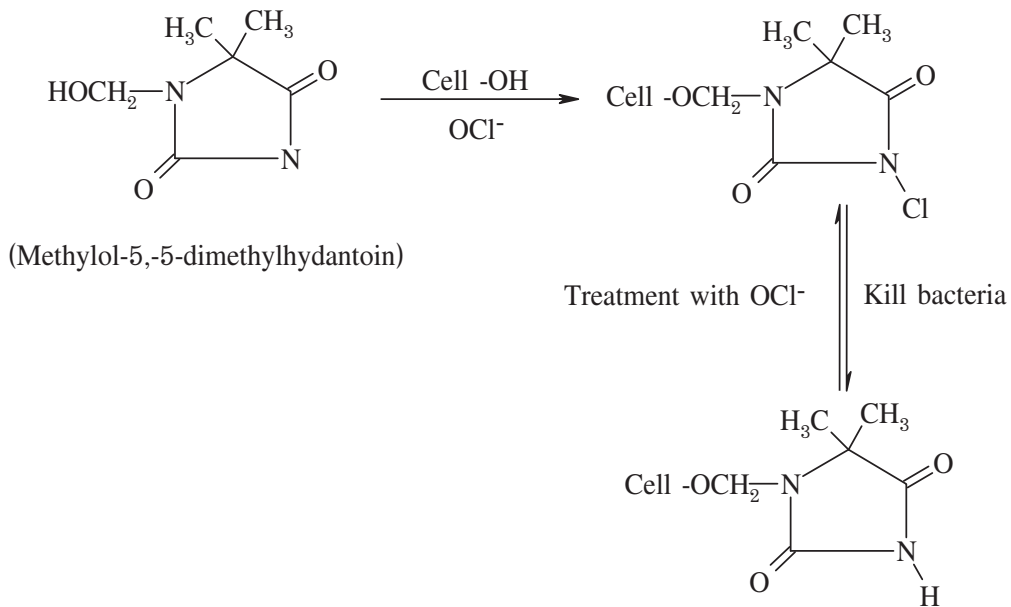
อุณหภูมิการฟอก 40°C (อุณหภูมิปกติ) เวลา 1 ชั่วโมง

ผ้าฝ้ายภายหลังผ่านกระบวนการฟอกขาวด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์จำเป็นต้องทำกระบวนการกำจัดคลอรีนที่หลงเหลือบนผ้าออกด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Antichlor โดยสารเคมีที่ใช้คือ sodium bisulfite (NaHSO<sub>3</sub>), sodium thiosulfite (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) หรือ hydrogen peroxide



นอกจากผ้าฝ้ายแล้ว โซเดียมไฮโปคลอไรท์ยังนิยมใช้ในการฟอกเส้นใยเซลลูโลสประเภทอื่น เช่น ลินิน (linen) แต่ไม่นิยมใช้ในการฟอกเส้นใยโปรตีน เช่น เส้นใยไหม เส้นใยขนสัตว์ และเส้นใยไนลอน เนื่องจากอะตอมคลอรีนในไอออนของไฮโปคลอไรท์จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับอะตอมไนโตรเจนของเส้นใย และเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า chloramine ซึ่งมีสีเหลือง ทำให้ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ และผ้าไนลอน มีสีขุ่นก่อนข้างเหลืองภายหลังการฟอก

ข้อดีของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ นอกจากจะสามารถเกิดปฏิกิริยาฟอกขาวผ้าที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้มีการนำมาใช้เป็นสารฟอกขาวผ้าตามบ้าน แล้วยังสามารถใช้ร่วมกับสารประกอบ chloramine (methylol-5,-5-dimethylhydantoin) เพื่อเสริมประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบนผ้าฝ้ายให้มีความคงทนต่อการใช้งานมากขึ้น ดังรูปที่ 5

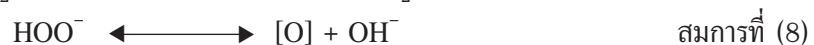
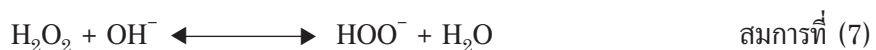


**รูปที่ 5** การเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบ chloramines บนเซลล์โลสเพื่อใช้งานเป็นสารตกแต่งสำเร็จด้านเชื้อแบคทีเรีย

### ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; $\text{H}_2\text{O}_2$ )

ปี ค.ศ. 1920 เริ่มมีการนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (หรือ “ไฮโดร”) มาใช้ในการฟอกผ้าฝ้าย ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกผ้าเพิ่มขึ้นทุกปี จนกระทั่งปัจจุบันสารฟอกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่า 90% คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสามารถใช้ฟอกเส้นใยได้ทุกชนิด และสามารถทำการฟอกขาวร่วมกับขั้นตอนการเตรียมผ้าขั้นตอนอื่น คือ ขั้นตอนการลอกแป้ง (desizing process) และขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรก (scouring) ในครั้งเดียวทำให้ลดขั้นตอนการผลิต ประหยัดเวลาเพิ่มขึ้น ประหยัดน้ำและสารเคมีที่ใช้ รวมถึงปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัดภายหลังกระบวนการที่ลดลง

ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกผ้าโดยทั่วไป คือ 35, 50 และ 70% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีสภาพเป็นกรดและมีฤทธิ์ในการกัดกร่อน ( $K_a = 1.5 \times 10^{-12}$ ) ซึ่งในการฟอกผ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยิ่งสูงยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการฟอกขาว เนื่องจากสามารถให้ออกซิเจนอิสระได้มาก แต่ต้องระวังเรื่องการเกิด oxycellulose ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นความเข้มข้นและปริมาณที่นิยมใช้ทั่วไป คือ 35% และ 50% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อละลายในสารละลายต่างจึงให้สารที่มีฤทธิ์ในการฟอกขาว คือ perhydroxyl ion ( $\text{HOO}^-$ ) ดังสมการที่ 7 และ 8



ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปัจจัยแรก คือ ค่า pH จากตารางที่ 2 เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความขาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นจนถึง pH เท่ากับ 11.0 หลังจากนั้นค่าความขาวของเส้นใยฝ้ายจะลดลง และเมื่อดูค่าความแข็งแรงของเส้นใยพบว่า pH 9 เส้นใยมีความแข็งแรงมากที่สุด แต่ที่ pH 11.0 perhydroxyl ion ที่เกิดขึ้นในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิด oxycellulose ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น pH ที่เหมาะสมสำหรับการฟอกขาวผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ pH ที่อยู่ระหว่าง 10.2-10.7

**ตารางที่ 2** ผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการฟอกขาว, ความแข็งแรงของเส้นใยและปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่บนเส้นใยฝ้าย [10]

pH		Whiteness*	Fiber degradation** (CUEN fluidity)	% peroxide ที่เหลืออยู่
เริ่มต้น	สุดท้าย			
Unbleached	-	34.2	0.96	-
8.0	4.4	66.8	5.48	72.5
9.0	8.7	67.3	1.44	71.6
10.1	9.9	71.3	2.44	63.3
11.0	11.7	72.2	7.29	7.0
12.0	12.4	69.5	17.8	2.0
<b>สูตรการฟอก:</b>		2.0 g/l H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (50%)	เวลา 60 นาที	
		5.0 g/l NaSiO <sub>3</sub> (420 Be')	อุณหภูมิ 90°C	
		0.5 g/l MgSO <sub>4</sub>		
		NaOH ปรับ pH		

**หมายเหตุ:** \* Whiteness ตาม AATCC test method 110-2000 [9] ค่าความขาวตามมาตรฐานอยู่ระหว่าง 72 ถึง 80

\*\*Fiber degradation\*\* ตาม AATCC test method 82-2001 ด้วยสารละลาย Cupriethylene diamine hydroxide (CUEN) ค่า CUEN fluidity ที่ยอมรับได้จะอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 3.3



ตารางที่ 3 ผลของ  $\text{NaSiO}_3$  และ  $\text{MgSO}_4$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ต่อประสิทธิภาพการฟอกขาว [9]

Concentration (g/l)		pH		Whiteness*	Fiber degradation** (CUEN fluidity)
$\text{NaSiO}_3$	$\text{MgSO}_4$	เริ่มต้น	สุดท้าย		
5.0	-	10.7	11.2	71.6	3.10
5.0	0.5	10.7	10.6	73.1	1.82
-	0.5	10.7	10.5	67.6	1.02

ปัจจัยที่สอง คือ การเติมโซเดียมซิลิเกต ( $\text{NaSiO}_3$ ) ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) เพื่อไม่ให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวเป็น perhydroxyl ion เร็วเกินไป จากตารางที่ 3 พบว่าการเติมโซเดียมซิลิเกตและแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ในการฟอกขาวผ้าฝ้ายจะช่วยประสิทธิภาพในการฟอกขาว ทำให้ได้ค่าความขาวตามมาตรฐาน คือ 73.1 และป้องกันการเกิด oxycellulose ที่ส่งผลต่อเส้นใยมีความแข็งแรงลดลง (CUEN fluidity = 1.82) โดยแมกนีเซียมไอออนจะช่วยควบคุมค่า pH ให้ต่ำกว่า 11.0 จึงช่วยลดการเกิด oxycellulose ได้

ปัจจัยสุดท้าย คือ อุณหภูมิ ส่วนใหญ่แล้วกระบวนการฟอกขาวผ้าฝ้ายด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพดีจะนิยมทำที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง คือ 90-100°C อาจใช้เครื่องจักรทั้งแบบตอนเดียว (exhaust) หรือแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous process) ก็ได้ ซึ่งปริมาณสารเคมีหรือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สำหรับการฟอกขาวด้วยเครื่องจักรแบบกึ่งต่อเนื่อง จะมีปริมาณเป็น 2 เท่าของเครื่องจักรแบบตอนเดียว

สูตรการฟอกผ้าฝ้ายด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (เครื่องจักรแบบตอนเดียว)

- $\text{H}_2\text{O}_2$  (35%)      3-5%
- NaOH                      0.3-0.8%
- $\text{NaSiO}_3$                     2-3%
- $\text{MgSO}_4$                     0.5%
- Wetting agent          0.1-0.5%
- อุณหภูมิ                    95-100°C
- เวลา                        60-90 นาที

สิ่งที่ต้องระวังอย่างยิ่งในการฟอกขาวผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ ไอออนของโลหะที่อาจปะปนอยู่บนผ้าระหว่างกระบวนการผลิตหรือจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการ เนื่องจากไอออนของโลหะจะส่งผลต่อการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เช่น ไอออนของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) จะยับยั้งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และคอปเปอร์ ( $\text{Cu}^{2+}$ ) จะเป็นตัวเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิด oxycellulose ผ้าที่ได้หลังการฟอกจึงขาดเป็นรูเล็กๆ บริเวณที่มีโลหะหนักอยู่ ลักษณะคล้ายเข็มหมุด เรียกว่า pin hole ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างที่ไม่อาจแก้ไขได้ ดังนั้นในการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนการเตรียมผ้าต่างๆ ต้องแน่ใจว่าไม่มีโลหะหนักปะปนอยู่ในกระบวนการด้วย และเพื่อป้องกันปัญหาการเกิด pin hole ทำได้โดยการเติม

สารจับโลหะหนัก (sequestering agent) ลงไปก่อนขั้นตอนการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ขั้นการกำจัดสิ่งสกปรก; scouring processes) และระหว่างการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยสารจับโลหะหนักที่นิยมใช้ คือ ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) ซึ่งเป็นสารประเภท aminocarboxylic acid เนื่องจากมีราคาถูก สามารถจับโลหะหนักได้ทุกชนิด และมีเสถียรภาพภายใต้ภาวะที่ต่าง

การใส่โซเดียมซัลเฟตในกระบวนการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึงแม้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฟอกผ้าฝ้าย แต่ทำให้มีผลึกโซเดียมซัลเฟตหลงเหลือบนผ้าและเครื่องจักร ส่งผลให้ผ้าเกิดความเสียหายจากการขัดถู (abrasion damage) ทำให้ในปัจจุบันการพัฒนากระบวนการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงเน้นกระบวนการที่ไม่ใช้โซเดียมซัลเฟต ดังนี้

- oxalates และ phosphate ทำหน้าที่เป็น stabilizer แทนโซเดียมซัลเฟต
- diethylene triaminepentaacetic acid (DTPA) เป็นสารจับโลหะหนักเพื่อป้องกันการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากไอออนของโลหะ
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นสารที่มีฤทธิ์ในการฟอกผ้า
- แมกนีเซียมซัลเฟตในการควบคุม pH เพื่อลดการเกิด oxycellulose
- สารลดแรงตึงผิวเป็นสารช่วยเปียก

อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้สารเคมีที่ค่อนข้างมีราคาที่สูงกว่ากระบวนการที่ใช้โซเดียมซัลเฟต (DTPA มีราคาที่สูงกว่า EDTA) ทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

ภายหลังผ่านการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มักมีสารเปอร์ออกไซด์ หลงเหลือบนผ้าที่ฟอกแล้วเสมอ ซึ่งเมื่อนำผ้าไปย้อมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่บนผ้าจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลสีแล้วทำให้สีหมดสภาพ ทำให้เจดสีการย้อมที่ได้ต่ำกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผ้าที่ผ่านการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงต้องกำจัดเปอร์ออกไซด์บนผ้าออกให้หมด อาจจะใช้วิธีการล้างผ่านน้ำมากๆ ซึ่งวิธีการนี้ทำให้มีน้ำเสียที่ต้องบำบัดมาก ปัจจุบันจึงนิยมใช้เอนไซม์คะตะเลส (catalase enzyme) ช่วยในการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หลงเหลืออยู่บนผ้าออก

## สรุป

กระบวนการฟอกขาวเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญในขั้นตอนการเตรียมผ้าที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ในเจดสีอ่อน ชนิดของเส้นใยเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสารเคมีที่ใช้ในการฟอก โดยชนิดของสารฟอกที่นิยมใช้ในการฟอกขาวผ้าฝ้าย คือ โซเดียมไฮโปคลอไรท์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่ในอุตสาหกรรมนิยมใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ เนื่องจากผ้าฝ้ายที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะได้ค่าความขาวที่สูงกว่าการฟอกด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถใช้เป็นสารฟอกเส้นใยธรรมชาติได้ทุกชนิด ไม่เพียงแต่ฟอกเส้นใยฝ้าย รวมถึงกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หลงเหลือบนผ้ายังทำได้ง่ายกว่าการกำจัดคลอรีนที่หลงเหลือบนผ้า ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อใช้ในการฟอกขาวผ้าให้สามารถทำการฟอกขาวร่วมกับขั้นตอนการเตรียมผ้าอื่นๆ เพื่อลดขั้นตอนการผลิต ทำให้ประหยัดเวลา น้ำ

สารเคมี และปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัดภายหลังกระบวนการ แนวทางการพัฒนาการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมุ่งเน้นที่การดัดแปรหรือเปลี่ยนชนิดของสารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการฟอกขาว เช่น ลดอุณหภูมิหรือเวลาในระหว่างกระบวนการฟอกขาว เป็นต้น หรือทำให้ผ้าภายหลังการฟอกมีคุณภาพที่ดีขึ้น เช่น ค่าความขาวหรือความแข็งแรงที่สูงขึ้น ในปัจจุบันแนวโน้มงานวิจัยด้านการพัฒนาสารฟอกขาวผ้าฝ้ายจะมุ่งเน้นการผลิตเอนไซม์เพื่อใช้ในการฟอกขาวผ้า เช่น การนำเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) มาผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งลักษณะงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะแบบบูรณาการ มีการทำวิจัยร่วมกันของนักวิจัยหลากหลายสาขา อาทิ นักวิจัยทางจุลชีววิทยาทำการคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ นักวิจัยทางพฤกษศาสตร์ทำการผลิตเอนไซม์ ส่วนนักวิจัยทางสิ่งทอจะมุ่งเน้นด้านการศึกษาผลของการนำเอนไซม์มาใช้ประโยชน์ เช่น การศึกษาผลของการฟอกขาวผ้าฝ้ายด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผลิตจากเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส หรือการศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ประเภทออกซิโดรีดักเทส (oxidoreductase) ในการฟอกผ้า เป็นต้น ซึ่งวัตถุประสงค์ส่วนใหญ่ในการทำวิจัยทางสิ่งทอ คือ การหาสารฟอกผ้าชนิดใหม่ทางชีวภาพเพื่อใช้งานจริงทางการค้าทดแทนการใช้สารฟอกสังเคราะห์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทางการค้า โดยผลการฟอกขาวผ้าต้องอยู่ในเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด

## เอกสารอ้างอิง

1. Karmakar, S. R. 1999. Textile Science and Technology. Volume 12. Chemical Technology in the Pre-Treatment Processes of Textiles. The Netherlands. Elsevier Science B. V. p.160-191, 350-354.
2. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. 2554. รายงานสถานการณ์อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย ประจำเดือนเมษายน 2554. ได้จาก [http://www.thaitextile.org/iu/link\\_content/Report\\_APL54.pdf](http://www.thaitextile.org/iu/link_content/Report_APL54.pdf). 13 ตุลาคม 2554.
3. Lewin, M., and Mark, H. 2007. Cotton Fiber Chemistry and Technology. In: Chemical Composition of Cotton. LLC. Taylor & Francis Group.
4. Segal, L., and Wakelyn, P. J. 1988. Cotton Fibres. In: Lewin, M., and Pearce, E., Editors. Fibre Chemistry. New York. Marcel Dekker.
5. Tomasino, C. 1992. Chemistry & Technology of Fabric Preparation & Finishing. Department of Textile Engineering, Chemistry & Science, College of Textiles, North Carolina State University. ได้จาก [www.p2pays.org/ref/06/05815.pdf](http://www.p2pays.org/ref/06/05815.pdf). 13 ตุลาคม 2554.
6. Perkin, W. S. 1996. Textile Coloration and Finishing. Durham North Carolina. Carolina Academic Press.
7. Clibbens, D. A., and Ridge, B. P. 1927. The Chemical Analysis of Cotton: Rate of Oxycellulose Formation. *Journal of Textile Institute* 18: T135-T167.
8. AATCC Test Method 82-2001. 2006. Fluidity of Dispersion of Cellulose from Bleached Cotton Cloth. U.S.A. American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC).

9. AATCC Test Method 110-2000. 2011. Whiteness of Textiles. U.S.A. American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC).
10. Rucker, J. W., and Smith, C. B. Troubleshooting in Preparation: A Systematic Approach. Textile Chemistry Department. North Carolina State University. ได้จาก [www.p2pays.org/ref/03/02332.pdf](http://www.p2pays.org/ref/03/02332.pdf). 13 ตุลาคม 2554.