

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อให้ผ้า และเส้นด้าย มีสีอันสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ผ้าหรือเส้นด้ายต่างชนิดกันจะใช้กรรมวิธีหรือขั้นตอนการฟอกย้อมที่ต่างกันตามชนิดเส้นใยของผ้าหรือเส้นด้ายนั้นๆ เส้นใยที่ใช้กันทั่วไปส่วนใหญ่ประกอบด้วยเส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ ฝ้าย ไหม ลินิน เป็นต้น

นอกจากชนิดเส้นใยที่ทำให้ขั้นตอนการฟอกย้อมต่างกันแล้ว การเลือกชนิดของสีย้อมให้เหมาะสมกับเส้นใยแต่ละชนิดก็เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากต้องการให้สีย้อมซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยสม่ำเสมอ และติดทนนานตลอดอายุการใช้งาน แต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบโดยทั่วไปคือผ้าหรือเส้นใยติดสีไม่เท่ากันในกระบวนการย้อมผ้า และผ้าหรือเส้นด้ายมีสีตกหรือจางลงเมื่อนำไปใช้งาน

##### 2.1.1 การเตรียมผ้าก่อนการย้อม

ฝ้ายดิบมีสิ่งเจือปนหลายชนิด เช่น สารประกอบเปคติน ซีลิ่งฝ้าย และไขมันต่างๆ โพรตีน และเถ้า อีกทั้งฝุ่น ดิน และทราย เพื่อให้ได้ใยฝ้ายที่สะอาดบริสุทธิ์ หรือสีสดใส ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ (อัจฉราพร ไสละสูตร และ ชิงรุ วาดานาเบ, 2524)

##### 2.1.1.1 การเผาขน (Singeing)

ผ้าฝ้ายมีขนบนผิวผ้าทำให้รูปลักษณะและความรู้สึกสัมผัสของผ้าลดลงจึงจำเป็นต้องเผาขนให้เรียบร้อย การเผาขนใช้ความร้อนได้ 3 ชนิด ได้แก่ เปลวแก๊ส แผ่นโลหะร้อน และไฟฟ้า ปกตินิยมเผาขนด้วยเปลวแก๊สมากที่สุดซึ่งสามารถเผาขนผ้าทั้งสองด้านหรือด้านเดียวก็ได้ สิ่งที่สำคัญในการเผาขนคือต้องเผาให้ไหม้สม่ำเสมอทั่วกันทั้งผืน อย่าใช้ความร้อนสูงจนกระทั่งเส้นใยเสื่อมคุณภาพ

##### 2.1.1.2 การเอาแป้งออก (Desizing)

ต้องขจัดสารที่ทำให้ด้ายย่นแข็งติดอยู่กับผ้าเพื่อให้การทำความสะอาด และการฟอกขาวในขั้นตอนต่อไปทำได้ผลดี กระบวนการนี้เรียกว่า การเอาแป้งออก โดยปกติสารทำให้แข็งที่ใช้เป็นประเภทแป้ง และสารสังเคราะห์ ฉะนั้นเวลาเอาแป้งออกต้องเอาผ้าแช่น้ำร้อนให้เส้นใยพองตัวช่วยให้สารช่วยย่อย (Enzyme) เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

กระบวนการลอกแป้งสามารถทำได้วิธีอื่นๆ อีก คือ การแช่ และหมักด้วยกรด (Acid-steeping) การแช่ และหมักด้วยเชื้อต่างๆ (Rot-steeping) และการใช้สารออกซิไดซ์ซึ่ง (Oxidizing agent) (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525)

### 2.1.1.3 การผ่านกรด (Aciding)

ใยฝ้ายจะมีเกลืออินทรีย์ สี สารสีสัง โพรตีน และอื่นๆ รวมอยู่ ดังนั้นถ้าต้องการให้ผ้าขาวสะอาดยิ่งขึ้นหรือให้สีสามารถซึมเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น ควรเอาผ้าไปผ่านสารละลายกรดกำมะถันเจือจาง ให้กรดทำปฏิกิริยาละลายสิ่งที่ไม่ต้องการเหล่านี้ออก

### 2.1.1.4 การทำความสะอาด (Souring)

การทำความสะอาดช่วยให้สีย้อม และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตขั้นต่อไปซึมทะลุเข้าไปภายในเส้นใยได้มากขึ้น ในงานอุตสาหกรรมใช้วิธีต้มในหม้อเคียร์ (Kier boiling) และวิธีอัดสารเคมีแล้วอบไอน้ำ (Pad steam) แบบต่อเนื่อง โดยรวมถึงซักหลายๆ ถังและที่อบไอน้ำ (Steam box) อาจเป็นถังรูปเจ (J-box) หรือรูปยู (U-box) เข้าด้วยกัน แต่ถ้าเป็นการทำความสะอาดภายหลังย้อมหรือผ้าเนื้อหนา ใช้ทำความสะอาดด้วยเครื่องจิก (Jigger) ความดันสูง

### 2.1.1.5 การฟอกขาว (Bleaching)

หลังจากทำความสะอาดแล้วยังคงมีสี และวัสดุเจือปนอื่นๆ เหลืออยู่ในผ้า การฟอกขาวจะทำให้สิ่งเหล่านั้นสลายตัวหรือลดน้อยลง สารฟอกสีที่ใช้กันมาก ได้แก่ สารฟอกสีคลอรีน (แคลเซียมไฮโปคลอไรท์) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เฉพาะการฟอกสีแบบต่อเนื่องนิยมใช้โซเดียมคลอไรท์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า

### 2.1.1.6 การชุบมัน (Mercerization)

เมื่อนำผ้าฝ้ายมาอัดด้วยสารละลายโซดาไฟเข้มข้นให้สารซึมเข้าไปภายในทั้งที่ผ้ายังถูกดึงให้ตึงอยู่จะทำให้มันเหมือนไหม ในขณะที่เดียวกันทำให้ฝ้ายดูดซึมสีย้อม และสารเคมีเพิ่มมากขึ้น และทำให้ผ้ามีความคงทนมากขึ้น

การชุบมันทำโดยแช่ฝ้ายให้จมอยู่ในน้ำสารละลายโซดาไฟแล้วผ่านลูกกลิ้งอีกชุดหนึ่งเพื่อดึงให้ตึงตามความยาว ผ่านไปยังเครื่องดึงผ้า (Stenter) แบบหนีบ (Clip) เพื่อดึงตามขวางแล้วผ่านลงไปใต้น้ำร้อน ผ้าจะเป็นมัน และซักสะอาดในที่สุด

เครื่องชุบมันอีกแบบหนึ่งทำงานโดยส่งผ้าที่ผ่านการแช่สารละลายโซดาไฟไปตามลูกกลิ้งหลายๆ ลูกจัดอยู่ชิดกัน (Chainless mercerizing machine)

## 2.1.2 กระบวนการย้อม

การย้อมเส้นด้ายหรือผ้าผืนให้สามารถติดสีได้คือนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย โดยเส้นใยแต่ละประเภทจะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมน้อยแตกต่างกัน จำเป็นจะต้องทราบถึงลักษณะของสีย้อมแต่ละชนิด เพื่อทำให้สามารถคัดเลือกชนิดสีย้อมให้เหมาะสมกับเส้นด้าย และผ้า

แต่ละชนิด นอกจากนี้สีย้อมบางชนิดจะต้องมีการเติมสารเคมีช่วยย้อมบางอย่างลงไปเพื่อให้สีย้อมติดกับเส้นใยอย่างคงทนไม่ว่าจะมีการซักล้างจากของเหลวชนิดใด

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับประเภทของสีย้อมที่ใช้ (Johnson, 1989)

เส้นใย	โครงสร้างทางเคมีของเส้นใย	สีย้อมที่ใช้
ขนสัตว์	$\text{NH}_2\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	เอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ รีแอคทีฟ โครม
ไหม	$\text{NH}_2$ , $\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	เอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ เบสิก เว็ด
คอปเปอร์โมเนียม เรยอน	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ไดเรกต์ เว็ด ซัลเฟอร์
วิสคอส เรยอน	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ไดเรกต์ เว็ด ซัลเฟอร์
ฝ้าย	$\text{OH}$	ไดเรกต์ เว็ด ซัลเฟอร์ รีแอคทีฟ
เซตกอนเดอรี เซลลูโลส ไตรอะซิเตด	$\text{OH}$ , $\text{OCOCH}_3$	ดิสเพอร์ส
เซลลูโลส ไตรอะซิเตด	$\text{OCOCH}_3$	ดิสเพอร์ส
ไนลอน 6.686	$\text{NH}_2$ , $\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	เอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ ไดเรกต์ ดิสเพอร์ส รีแอคทีฟ
อะครีลิก	$\text{COOH}$ , $\text{SO}_3\text{H}$ , $\text{OSO}_3\text{H}$	เบสิก ดิสเพอร์ส
โพลีเอสเตอร์	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$ , $\text{COO}$	ดิสเพอร์ส

กระบวนการย้อม และเครื่องย้อมที่สำคัญได้แก่

#### 2.1.2.1 เครื่องจิก (Jigger)

ผ้าที่ย้อมจะถูกม้วนกลม มีเหล็กกลมตันเป็นแกนผ่านลงไปใต้น้ำย้อมแล้วม้วนกลับเข้าแกนเหล็กใหม่อีกอันหนึ่ง ทำเช่นนี้กลับไปกลับมาหลายๆ ครั้ง จนผ้าดูดสีในน้ำย้อมหมด หรือมีสีเข้มเท่าที่ต้องการ

การย้อมวิธีนี้ค่อนข้างจะมีประสิทธิภาพและประหยัด แต่เพราะใช้อัตราส่วนของน้ำน้อย จึงทำให้สีที่ปลายทั้งสองด้านกับบริเวณริมผ้าหนาๆ มีสีไม่เท่ากัน อันเป็นข้อเสียของการย้อมด้วยเครื่องจิก

#### 2.1.2.2 เครื่องย้อมวินซ์ (Winch)

ผ้าที่จะย้อมต้องเย็บต่อเป็นวงกลมใส่ลงในระวิงรูปไข่ ส่วนหนึ่งแช่อยู่ในน้ำสี อีกส่วนหนึ่งพาดอยู่บนระวิงเมื่อระวิงหมุนไปรอบๆ ส่วนตอนแบนของรูปไข่จะพาผ้าผ่านขึ้นจากน้ำย้อมเปลี่ยนที่ตลอดเวลา ผ้าจะดูดน้ำสีได้เท่าเสมอกัน แต่มักเกิดรอยเสียดสีรอยพันกัน

### 2.1.2.3 เครื่องอัดรีดน้ำ (Padder)

เป็นส่วนประกอบที่จำเป็นในการย้อมแบบต่อเนื่อง เป็นส่วนที่ให้ผ้าแช่ลงไปในน้ำละลายสีแล้วอัดรีดเอาน้ำออก

### 2.1.2.4 การย้อมโดยวิธีอัดสี และอบไอน้ำ (Pad steam dyeing)

วิธีนี้เป็นวิธีย้อมแบบต่อเนื่อง ย้อมในลักษณะที่ผ้าขยายเต็มตามความกว้างอัดผ้าด้วยน้ำย้อมแล้วผ่านไปยังเครื่องอบไอน้ำที่มีไอน้ำอิมตัวที่อุณหภูมิ 102 ถึง 104 องศาเซลเซียส โดยที่ไอน้ำในตู้ต้องไม่มีอากาศหรือฟองไอน้ำอิมตัวลงบนผิวผ้าเพื่อให้สีติดนานตั้งแต่ 15 วินาทีจนกระทั่งถึง 2 ถึง 3 นาที ย้อมได้เร็วมาก เป็นวิธีย้อมที่มีประสิทธิภาพและประหยัด นิยมย้อมกันทั่วไป การย้อมโดยวิธีอัดสี และอบไอน้ำนี้ใช้ย้อมสีได้หลายชนิด เช่น สีแควด สีไคเรกท์ สิริแอคทีฟ เป็นต้น ถ้าใช้ย้อมสีไคเรกท์วิธีนี้ย้อมได้สีเข้มเพียงปานกลางเท่านั้น ย้อมสีเข้มไม่ได้ผล

### 2.1.2.5 การย้อมโดยวิธีอัด และเครื่องจิก (Pad jig dyeing)

ผ้าที่ผ่านการอัดสีแล้วจะอบแห้งก่อนหรือไม่ก็ได้ แล้วนำไปย้อมในสารละลายเคมีอีกครั้งหนึ่ง ใช้เครื่องย้อมจิกเพื่อให้สีติดเป็นวิธีย้อมกึ่งต่อเนื่อง และทำได้ง่ายที่สุด

เหมาะสำหรับการย้อมสีไคเรกท์ สิริแอคทีฟ สีแควด และสีแควดที่ละลายน้ำได้ แต่ไม่เหมาะสำหรับย้อมสีเข้ม

### 2.1.2.6 การย้อมโดยวิธีอัดแล้วม้วนหนัก (Pad roll dyeing)

ผสมน้ำย้อมลงในถังรูปตัวยูทำให้ร้อนคงที่ตลอดเวลาที่อัดผ้า โดยใช้อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิของตู้อบผ้าตู้แรก อัดผ้าให้มีน้ำย้อมอิมตัวผ่านไปยังตู้อบผ้าตู้แรก ระเหยน้ำที่ผิวผ้าออกเล็กน้อยพอให้ผิวแห้งแล้วผ่านเข้าไปม้วนใส่แกนเหล็กในตู้ย้อม ภายในตู้มีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้สำหรับสีชนิดนั้น ปลอ่ยให้ผ้าที่ม้วนใส่แกนไว้หมุนไปรอบ อย่างช้าๆ นานพอเหมาะที่จะให้สีนั้นติดผ้าได้ดี นิยมใช้ย้อมสีไคเรกท์ สิริแอคทีฟ สีแควด

### 2.1.3 การตกแต่ง

การตกแต่งภายหลังการย้อมตกแต่งโดย การพ่น (Spray) การยัด (Tentering) การรีดมัน (Calendering) การทำให้แข็ง (Sizing) การลงเรซิน (Resin treatment) กันหดตามความจำเป็น เพื่อให้ผ้าผ่านมาตรฐานผลผลิตขั้นสุดท้าย (ความกว้าง ความยาว ความแน่น ผิวสัมผัส และสี)

## 2.2 ลักษณะของน้ำเสียฟอกย้อม

ในกระบวนการฟอกย้อมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ และเครื่องนุ่งห่ม มีการใช้น้ำและสารเคมีในปริมาณมากซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด สีย้อมจะติดเส้นใยได้ 40 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (Arslan และ Balcioglu, 1999; Moraes และ คณะ, 2000)

หากคิดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตจะพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วในการผลิตผ้า 1 กิโลกรัมจะใช้น้ำ 167 ลิตร (ก้องเกียรติ เจริญธีรวงศ์, 2543) นอกจากนี้การใช้สารเคมีต่าง เช่น สารทำความสะอาด สารช่วยย้อม เป็นต้น ซึ่งจะเหลืออยู่ในน้ำทิ้งหลังจากผ่านกระบวนการฟอกย้อม

### 2.2.1 แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม (ชนิตา เสมรัตน์, 2543)

น้ำเสียฟอกย้อมนี้ประกอบด้วยสารเคมี และสิ่งอื่นๆ ที่ปะปนกับเส้นใย เช่น น้ำมัน และไขมัน เป็นต้น แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้

#### 2.2.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ

น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม ขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างแต่ส่วนใหญ่ มักถูกปล่อยเป็นน้ำเสียออกมาเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง คือ กระบวนการต้มแปรง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสีและการตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า น้ำที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสารมลพิษสูง มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเส้นใยที่นำมาย้อม และกระบวนการย้อมที่ใช้

- น้ำที่ใช้ในการซักล้างหลังจากการฟอกย้อมหรือการพิมพ์ น้ำที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำกว่าน้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง

#### 2.2.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตหรือให้ความร้อนแก่ตู้อบไอน้ำ ไอน้ำนี้ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลง และทำให้เกิดการกลั่นตัวในท่อน้ำก็จะได้น้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้านำไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงก็เท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำเสียให้มากขึ้น

#### 2.2.1.3 น้ำหล่อเย็น

ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลงในระยะเวลาอันสั้น โดยการใช้ น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

#### 2.2.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร และการทำความสะอาดโรงงาน

น้ำส่วนนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ในบางกรณีน้ำเสียชนิดนี้อาจมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆ สูง เช่น น้ำที่ใช้ล้างสกรีนที่ใช้ในการพิมพ์ผ้าหรือน้ำจากการล้างถังเตรียมสี เป็นต้น

#### 2.2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม (จารุทัศน์ มลิณฑะเลข, 2537)

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมเป็นดังนี้

(ก) มีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูง โดยเกิดจาก แป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วสารอินทรีย์อาจเกิดจาก สบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝัากลุ่มคือน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้มักมีค่าบีโอดีค่าประมาณ 100 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีสูงประมาณ 500 ถึง 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ข) มีค่าพีเอชและค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงฟอกย้อมมักมีค่าพีเอชประมาณ 9 ถึง 12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300 ถึง 900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอช และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต

(ค) มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส

(ง) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียม และกรดต่างๆ

(จ) มีความเข้มข้นสูง โดยเป็นสีที่เข้มข้นผ้า

(ฉ) มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้วได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

(ช) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

#### 2.2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

##### 2.2.3.1 สารอินทรีย์

(ก) ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง (Dissolve Oxygen, DO) มีผลทำให้

- สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน
- ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (Self-purification) ได้ทัน
- ทำให้เกิดกลิ่น
- ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

(ข) สารอินทรีย์บางตัวอาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- เกิดการสะสมในระบบนิเวศหากสารนั้นเป็นสารที่สลายตัวได้ยาก

- เป็นอันตรายต่อมนุษย์หากได้รับสารนั้นโดยตรง หรือทางอ้อมจากห่วงโซ่อาหารหรือจากสารนั้นที่สะสมในระบบนิเวศ

#### 2.2.3.2 อุณหภูมิ

น้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูงมีผลให้

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดลดลง
- เพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์

#### 2.2.3.3 ของแข็งแขวนลอย

- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ
- สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้
- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

#### 2.2.3.4 ของแข็งละลายน้ำ

ถ้าความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำบางชนิดที่มีส่วนประกอบของโลหะหนัก เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม มีความเข้มข้นสูงกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นอันตรายต่อปลา หรือทองแดงที่มีความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในน้ำ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และกาญจนา ครองธรรมชาติ, 2525) ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

#### 2.2.3.5 สี

- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
- ทำให้ปริมาณแสงที่ผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง

#### 2.2.3.6 โลหะหนัก

- ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคร้ายแรงได้
- โลหะหนักเป็นสารที่สะสมอยู่ในระบบนิเวศได้
- เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์

### 2.3 สีย้อม

#### 2.3.1 การเกิดสี

ส่วนประกอบที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม คือ

##### 2.3.1.1 โครโมฟอร์ (Chromophores)

โครโมฟอร์เป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์กลุ่มที่ไม่อิมิตัวประกอบด้วยพันธะคู่ และทำหน้าที่ให้สีแก่โมเลกุลของสีย้อม เมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงมากระทบ

จะทำให้โครงสร้างโครโมฟอร์เกิดการสั่น (Oscillates) เนื่องจากมีการดูดกลืน (Absorb) แสง บางความยาวคลื่นทำให้เห็นสีตามช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน โดยโครโมฟอร์กลุ่มอะโซเป็น กลุ่มที่นิยมใช้กันมากถึงร้อยละ 50 โครโมฟอร์แบ่งเป็นประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 โครโมฟอร์ของสีย้อม (Rangnekar, 1980)

โครโมฟอร์	พันธะ	ชื่อ
	$—N=N—$	Azo
	$\begin{array}{c} \diagup \\ C=S \\ \diagdown \end{array}$	Thio
	$—N=O$	Nitroso
	$\begin{array}{c} —N=N^+ \\   \\ O^- \end{array}$	Azoxy
	$\begin{array}{c} O \\ \nearrow \\ —N \\ \searrow \\ O \end{array}$	Nitro
	$—\overset{H}{C}=N—$	Azomethine
	$\begin{array}{c} \diagup \\ C=O \\ \diagdown \end{array}$	Carbonyl
	$\begin{array}{c} \diagup \\ C=C \\ \diagdown \end{array}$	Ethenyl



### 2.3.1.2 ออกโซโครม (Auxochromes)

ออกโซโครมเป็นกลุ่มที่สร้างลักษณะของความเข้มสี (Intensity) หรือปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดติดกับเส้นใยให้กับสีย้อม เพราะโมเลกุลส่วนนี้จะก่อให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใยซึ่งจะทำให้เกิดการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยขึ้น โดยอาจเป็นพันธะอิกอนิก พันธะโควาเลนต์ แรงวันเดอร์วาลส์ หรือ โดยการแทรกซึมของอนุภาคสีย้อมเข้าไปในเส้นใย ออกโซโครมของสีย้อมแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ออกโซโครมของสีย้อม (Rangnekar, 1980)

	ชื่อ	กลุ่ม
	Amino	-NH <sub>2</sub>
	Methylamino	-NHCH <sub>3</sub>
	Dimethyl amino	-NH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Sulphonic acid	-SO <sub>3</sub>
	Hydroxy	-OH
	Carboxylic acid	-COOH
	Chloro	-Cl
	Methyl	-CH <sub>3</sub>
	Methoxy	-OCH <sub>3</sub>
	Cyano	-CN
	Acetyl	-COCH <sub>3</sub>
	Amido	-CONH <sub>2</sub>



2.3.2 ประเภทของสีย้อม

สีย้อมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.2.1 แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี

เมื่อพิจารณาจากโครโมฟอร์ที่ประกอบอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมพบว่าสีย้อมที่มีในท้องตลาดมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงสร้างหลักอยู่จำนวนมาก โดยโครงสร้างหลักที่เป็นที่รู้จักแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทของสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (Rangnekar, 1980)

Class	Subclass	Class	Subclass
Nitro	-	Indamine and Indophenol	-
Nitroso	-	Azine	-
Azo	Monoazo	Oxzazine	-
	Biazo	Thiazine	-
	Triazo	Cyanine	Methine
	Polyazo		Quinoline
	Mordant azo	Sulphur	-
	Stilbene azo	Lactone	-
Pyrazolone azo	Aminoketone	-	
Diphenylmethane	-	Hydroxyketone	-
Triphenylmethane	-	Anthraquinonoid	-
Xanthene	-	Indigoid	-
Acridine	-	Sulphurized vat dyes	-
Thiazole	-	Phthlocyanine	-
Indamine & Indophenol	-		

### 2.3.2.2 แบ่งตามการใช้งาน

การแบ่งประเภทของสีย้อมตามการใช้งาน โดยพิจารณาสีย้อมที่ใช้กับเส้นใยประเภทต่างๆ จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำ และการยึดเกาะกับเส้นใย (Affinity and Substantivity) รวมทั้งสถานะของโมเลกุลสีย้อม เช่น สถานะที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กกระจายอยู่ในของเหลวสำหรับสีย้อมดิสเพอร์ส เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5

### 2.3.3 สีย้อมอะโซ (Azo dyes)

สีย้อมอะโซ เป็นสีกลุ่มใหญ่ที่สุดที่ใช้ในอุตสาหกรรม เพราะสังเคราะห์ได้ง่าย และให้เฉดสีครบทุกเฉด ประกอบด้วยกลุ่มอะโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ทำหน้าที่เป็นโครโมฟอร์ และมีออกโซโครมได้หลายกลุ่ม พันธะอะโซประกอบด้วยไนโตรเจนสองอะตอม ( $-N=N-$ ) เชื่อมต่อกับคาร์บอนอะตอมโดยอย่างน้อยที่สุดต้องมีด้านหนึ่งของไนโตรเจนเชื่อมกับสารอะโรมาติก ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นวงเบนซีนหรืออนุพันธ์ของแนฟทาลีน หรือเฮเทอโรไซเคิล เช่น ไพราโซโลน และ ไทอะโซล เป็นต้น สารตัวกลางในปฏิกิริยา (Intermediate) มี 2 ชนิด คือ สารร่วมทำปฏิกิริยา (Coupling) และ ไดอะโซ ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกรดหรือด่าง

ไดอะโซนิยมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะริลามีนหรือเฮเทอโรไซเคิลอะมิโนกับสารร่วมปฏิกิริยา

ประเภทของสีย้อมอะโซ ได้แก่ (Rangnekar, 1980)

(ก) Monoazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซเพียง 1 กลุ่ม และแบ่งได้เป็น 8 ชนิด คือ

- Monoazo Direct dyes
- Monoazo Acid dyes
- Monoazo Food colors
- Monoazo Mordant dyes
- Monoazo Solvent dyes
- Monoazo Disperse dyes
- Monoazo Cationic dyes
- Monoazo Reactive dyes

(ข) Diazo หรือ Biazo dyes

(ค) Triazo dyes มีโครโมฟอร์อะโซ 3 กลุ่ม

(ง) Polyazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซตั้งแต่ 4 กลุ่มขึ้นไป

(จ) Mordant azo dyes คือ กลุ่มอะโซที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเพิ่มการยึดเกาะ

ตารางที่ 2.5 ประเภทสีย้อมแบ่งตามการใช้งาน (Buckley, 1992)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางทางเคมีและกายภาพ	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมเอซิด (Acid dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3 ถึง 5 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (Metal complex acid dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5 ถึง 7 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส
สีย้อมไดเรกต์ (Direct dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิตคอต	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายค่างอ่อน - เดิมอิเล็กโตรไลท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟตและสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส
สีย้อมเบสิก (Basic or cation dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4 ถึง 6 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ 100 ถึง 105 องศาเซลเซียส
สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dyes)	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - อะคริลิก - เซลลูโลส - อะซิเตด	- เนื่องจากเป็นคอลลอยด์จึงเป็นการดูดติดผิวเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4 ถึง 5 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส
สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิตคอต - ขนสัตว์	- พันธะโควาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมเกลือเพื่อกระจายสีไปสู่เส้นใย - หลังจากนั้นเติมค่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยกับสีย้อม
สีย้อมอะโซอิก (Azoic dyes)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยา - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิตคอต	- เกิดการตกผลึกขึ้นภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายค่างที่มีโซเดียมซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลท์
สีย้อมเว้ด (Vat dyes)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยา - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิตคอต	- เกิดการตกผลึกขึ้นภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายค่างที่มีโซเดียมซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลท์
สีย้อมมอร์แดนต์ (Mordant or chrome dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	- พันธะเชิงซ้อนของเส้นใยและสีย้อมโครม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมโซเดียมไดโครเมต เดิมสีย้อมเพิ่มอุณหภูมิถึง 98 องศาเซลเซียส

(ค) Stibene azo dyes ประกอบด้วยอะโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ซึ่งให้สีเหลืองหรือส้มที่สามารถย้อมได้เร็วและมีการยิดเกาะที่ดีสำหรับเส้นใยฝ้าย

(ข) Pyrazolone azo dyes เป็นสีย้อมอะโซที่มีหมู่ไพราซอลในโครงสร้าง

### 2.3.4 สีย้อมไคเรกต์ (Direct dyes)

สีย้อมไคเรกต์เป็นสีย้อมที่สังเคราะห์ขึ้น ละลายน้ำได้ดีเนื่องจากมีหมู่ซัลโฟเนต ( $-SO_3Na$ ) หรือหมู่คาร์บอกซิลิก ( $-COOH$ ) และจะแตกตัวให้ประจุลบซึ่งเป็นส่วนให้สี บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้าย ซึ่งชื่อนี้มาจากการที่สีย้อมชนิดนี้สามารถย้อมติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยย้อมใดๆ แต่มีข้อเสียคือไม่คงทนต่อการซักล้าง ปัจจุบันการย้อมด้วยสีย้อมไคเรกต์จะใช้เกลือช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้ดีขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพวกอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีจำนวนมากกว่าสีประเภทอื่น มีโทนสี คุณสมบัติในการย้อม ความคงทน ตลอดจนราคาที่แตกต่างกันมากซึ่งถ้าเป็นสีที่มีความคงทนในการย้อมดี โครงสร้างก็จะซับซ้อนมากขึ้นราคาก็จะแพงมากขึ้นด้วย

สีย้อมไคเรกต์เกาะติดกับเส้นใยเซลลูโลสแบบสัมพัทธ์ ดังนั้นการเนบสนิทกันมากเท่าใดก็จะทำให้สีติดแน่นอยู่กับเส้นใยมากขึ้นเท่านั้น โครงสร้างทางกายภาพของสีย้อมไคเรกต์มีลักษณะ ดังนี้

- แบนราบเหมือนกระดาษไม่โค้งงอหรือบิดเบี้ยว
- มีความยาว
- ผลิตจากสารตั้งต้นที่ไม่เป็นพิษ

### 2.3.5 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dyes)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุดโดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง การย้อมสีย้อมรีแอคทีฟนั้นต้องทำในสภาวะที่ค่าพีเอชมีค่าตั้งแต่ 11 ขึ้นไป ขณะย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี ( $OH$ ) ของเส้นใยเซลลูโลสแล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์เพื่อสร้างสารประกอบครอสลิงก์กับเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้เกิดเป็นสีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ทั้งหมดจึงมีสีย้อมบางส่วนสูญเสียไปกับน้ำย้อม และการซักล้างเอาส่วนนี้ออกให้สมบูรณ์ต้องอาศัยน้ำ และพลังงานมาก ทำให้ต้นทุนสูงกว่าการย้อมสีย้อมไคเรกต์

โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของสีย้อมรีแอคทีฟมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น ฟาธาโลไซยานีน แอนทราควิโนนอยด์ กลุ่มอะโซ เป็นต้น

โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ



(ก) D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส

(ข) X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สียึดเกาะปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใย

(ค) T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง กลุ่มรีแอกทีฟ กับ โครโมฟอร์ เช่น หมู่  $-\text{NH}-$ ,  $-\text{NHCO}-$ ,  $-\text{SO}_2-$ ,  $-\text{NHSO}_2-$  และ  $-\text{NCH}_3-$  เป็นต้น

(ง) S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับ โครโมฟอร์ โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิคหรือหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่านั้น

ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สียึดเกาะแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ กลุ่มโครโมฟอร์ (D) และกลุ่มรีแอกทีฟ (X) ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์ โดยตรงโดยไม่มีกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกวงแหวนไฮดรอกซิลิก

### 2.3.6 การเห็นสี

การเห็นสีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีองค์ประกอบ 4 ประการ คือ แสง วัตถุสี ฉายแสงของผู้เห็นสี และสมองที่จะทำการวิเคราะห์และตีความของสีนั้นๆ โดยจะมองเห็นวัตถุเป็นสีอะไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าแสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้นเข้าสู่ตาเราประกอบด้วยรังสีแสงในช่วงความยาวคลื่นใดบ้าง วัตถุจะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งไว้ แล้วสะท้อนแสงที่เป็นคลื่นแสงเต็มเต็มของการดูดกลืนคลื่นแสงของวัตถุนั้นออกมา แสงนั้นเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (e) จากออร์บิทัล (Orbital) หนึ่งไปสู่ออร์บิทัลหนึ่งภายในโมเลกุล ช่วงความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุนั้นจะขึ้นกับค่าพลังงานที่แตกต่างกันของออร์บิทัลทั้งสอง ดังนั้นสีของวัตถุจะมีสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorption spectrum) ต่างกันขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของสีนั้น

#### 2.3.6.1 แสง

แสงเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ และให้ความรู้สึกไวต่อประสาทตาของเรา ในบรรดาช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์จะมีความยาวคลื่นแตกต่างกันออกไป เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงอินฟราเรด

คลื่นโทรทัศน วิทยุ เเรคาร์ เป็นต้น แต่ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้จะอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร เท่านั้น

ในช่วงคลื่นดังกล่าว แสงกลางวันที่มองเห็นเป็นสีขาวนั้นประกอบด้วยแถบแสงสีซึ่งมองเห็นได้ (Visible spectrum) โดยตาของคนปรกติจะสามารถแยกสีออกจากแถบแสงสีนั้นได้อย่างเด่นชัดด้วยกัน 6 แสงสี คือ ม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง ทั้งนี้ถ้าเอาแสงสีทั้ง 6 สีนี้ผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมก็จะได้สีขาวกลับคืนมา

### 2.3.6.2 วัตถุสี

ถ้าวัตถุใดๆ สามารถสะท้อนสีที่ตกกระทบบนตัวมันออกได้ทุกความยาวคลื่นในแถบแสงสีขาวโดยไม่ดูดเอาแถบแสงใดแถบแสงหนึ่งไว้ วัตถุนั้นจะได้รับการมองเห็นเป็นสีขาว แต่ถ้าวัตถุนั้นดูดเอาแถบแสงสีทั้งหมดไว้ไม่สะท้อนแสงสีแถบใดออกมาเลย วัตถุนั้นจะถูกมองเห็นเป็นสีดำ ส่วนในกรณีที่เรามองเห็นวัตถุหนึ่งๆ เป็นสีต่างๆ นั้น เป็นเพราะวัตถุนั้นดูดกลืนเอาคลื่นแสงความยาวคลื่นช่วงหนึ่งๆ ไว้ และสะท้อนแต่แสงความยาวคลื่นอื่นๆ ออกมา

### 2.3.6.3 นัยน์ตา

ลูกนัยน์ตามีจอรับภาพที่เรียกว่าเรตินา ซึ่งประกอบด้วยเซลล์รูปร่างเป็นแท่ง และกรวยที่มีความรู้สึกรวดต่อสีมาก ทั้งเซลล์รูปร่างแท่งและกรวยจะร่วมกันทำหน้าที่วิเคราะห์สีที่ผ่านเข้ามานัยน์ตา และส่งสัญญาณไปยังสมองต่อไป ทางด้านหลังของลูกตาจะมีม่านตา ซึ่งทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงที่เข้าสู่ตา ม่านตาจะเปิดกว้างเมื่อมีปริมาณแสงน้อย และจะปิดเหลือเพียงจุดเล็กๆ ถ้าแสงจ้าและมีความเข้มมาก

### 2.3.6.4 สมอง

สมองจะได้รับสัญญาณการมองเห็นจากตา และส่งงานให้จิตสำนึกได้รับรู้ ทั้งนี้สัญญาณที่ถูกส่งมาจากตาจะต้องได้รับการถอดรหัส และเปรียบเทียบกับประสบการณ์หรือความจำที่มีอยู่ในสมอง แล้วสมองจึงจะส่งงานออกมาแล้วส่งให้ความรู้สึกได้ทราบว่าจะขณะนั้นได้เห็นสีใด

## 2.3.7 การเรียกชื่อสีข้อม

### 2.3.7.1 ชื่อทั่วไป (Trivial name)

ชื่อทั่วไปเป็นชื่อของสีข้อมที่ไม่มีหลักการในการเรียกชื่อสีข้อมที่แน่นอน บางชื่อก็เป็นชื่อที่เรียกสีข้อมบางตัวมาแต่สมัยโบราณ เช่น ชื่อสี อินดิโก เป็นต้น บางชื่อตั้งขึ้นเมื่อมีการสังเคราะห์สีขึ้น โดยเฉพาะในระยะแรกๆ เช่น ชื่อสีอะนิลีน แบลก เป็นต้น ชื่อสีเหล่านี้เป็นที่นิยมเรียกในสมัยก่อนแต่ปัจจุบันการใช้เริ่มลดน้อยลง เมื่อชื่อตามคัลเลอร์อินเด็กซ์เป็นที่ยอมรับกันมากขึ้น

### 2.3.7.2 ชื่อทางเคมี (Chemical name)

ชื่อทางเคมีของสีย้อมจะเรียกตามสูตรโครงสร้างในโมเลกุลของสีย้อม ชื่อทางเคมีนั้นยาว และยุ่งยาก เนื่องจากสีย้อมมีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่ และซับซ้อนซึ่งจึงไม่นิยมใช้

### 2.3.7.3 ชื่อทางการค้า (Trade name)

ชื่อทางการค้าเป็นชื่อที่บริษัทผู้ผลิตสีย้อม ตั้งขึ้นเพื่อใช้เรียกสีย้อมที่ผลิตขึ้น สีย้อมตัวเดียวกันอาจมีหลายชื่อ ถ้าบริษัทที่ผลิตสีย้อมนั้นมีหลายบริษัท ชื่อทางการค้ามักประกอบด้วยส่วนประกอบของชื่อดังนี้

ชื่อบริษัทที่ตั้งขึ้น (มักบอกชื่อบริษัทและประเภทของสี) ตามด้วยชนิดของสี (เจดสี) ตามด้วยตัวอักษร (สำหรับบอกคุณสมบัติบางอย่างของสี) และตามด้วยตัวเลข (มักใช้บอกความเข้มของสี)

ตัวอักษรที่ใช้มากได้แก่

R	-	Reddish	S	-	Sublimation
B	-	Bluish	W	-	Wash fastness properties
G	-	Greenish	N	-	Neutral (dye bath condition)
L	-	Good light fastness	E	-	Exhaustion (dyeing method)

### 2.3.7.4 ชื่อตามกัลเลอร์อินเด็กซ์ (C.I. Generic name)

กัลเลอร์อินเด็กซ์ คือ บัญชีรายชื่อสีย้อมทั้งหมดที่มีอยู่ในท้องตลาดจนถึงปี 2519 มาจัดเรียงไว้ที่เดียวกัน และได้ตั้งชื่อให้แก่ สีย้อมขึ้นใหม่เรียกว่า C.I. Generic name ทั้งนี้เพื่อว่าสีย้อมแต่ละตัวจะได้มีชื่อเป็นที่รู้จัก และยอมรับโดยทั่วไปเพียงชื่อเดียว ชื่อสีที่กำหนดไว้ตามกัลเลอร์อินเด็กซ์นี้ประกอบด้วยส่วนต่อไปนี้ คือ C.I. ตามด้วย ประเภทของสีแบ่งตามวิธีการย้อมตามด้วย โทนสี และตามด้วย ลำดับตัวเลข เช่น C.I. Direct Black 19 หรือ C.I. Reactive Red 198 เป็นต้น สำหรับโทนสีมีทั้งหมด 8 สี ด้วยกันเรียงตามลำดับดังนี้คือ เหลือง (Yellow) แสด (Orange) แดง (Red) ม่วง (Violet) ฟ้า (Blue) เขียว (Green) น้ำตาล (Brown) และดำ (Black) นอกจากการกำหนดโทนสีของสีย้อมดังกล่าวข้างต้นแล้ว ในกัลเลอร์อินเด็กซ์ยังได้กำหนดหมายเลข (C.I. Number) ประจำสีย้อมแต่ละตัวที่มีทางเคมีที่เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปด้วยตัวเลขนี้ มี 5 ตำแหน่ง เช่น สี C.I. Basic Blue 25 มีหมายเลข C.I. 52025 เป็นต้น

การกำหนดชื่อสีย้อมตามกัลเลอร์อินเด็กซ์ เป็นผลงานร่วมกันของสมาคมผู้ประกอบการย้อมในอังกฤษและสหรัฐอเมริกา ในปัจจุบันชื่อกัลเลอร์อินเด็กซ์กำลังได้รับความนิยมและใช้กันมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในทางวิชาการปัจจุบัน ซึ่งกัลเลอร์อินเด็กซ์ที่ใช้กันอยู่เป็นฉบับพิมพ์ครั้งที่ 3 และมีทั้งหมด 7 เล่ม แต่ละเล่มครอบคลุมข้อมูลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6



ตารางที่ 2.6 ข้อมูลคัลเลอร์อินเด็กซ์ (กาวิ ศรีกุลกิจ, 2544)

คัลเลอร์อินเด็กซ์	
Volume 1-3 (1971)	Dyes and pigments classified by usage with technical information arranged under C.I. Generic Name
Volume 1	Acid, Azoic, Basic
Volume 2	Developers, Direct, Disperse, Fluorescent Brightness, Food, Ingrain, Leather
Volume 3	Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Reducing agent, Solvent, Sulphur, Vat
Volume 4 (1971)	Dyes and pigments classified by chemical constitution with structure arranged under C.I. Constitution Number. Technical information of intermediate compounds
Volume 5 (1982) (Second revision)	Commercial names of currently available and obsolete dyes and pigments arranged by C.I. Generic names and alphabetically
Volume 6 (1976)	Supplement to Vol. 1-4, listing information on products with new C.I. Generic names and newly disclosed constitutions published constitutions published between 1970-1974
Volume 7 (1982)	Supplement to Vol. 1-4 and 6 listing information between 1974-1980

### 2.3.8 หน่วยสีเอดีเอ็มไอ (ADMI units)

ปัจจุบันค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสีนั้น มีข้อกำหนดว่า สีหรือกลิ่นของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ทั้งยังไม่ได้กำหนดวิธีวิเคราะห์ด้วยประกาศอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539

ในการวัดสีในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมซึ่งมีความเข้มสีสูง สถาบันผู้ผลิตสีแห่งอเมริกา (American Dye Manufacturers Institute; ADMI) ได้จัดตั้งคณะกรรมการทางนิเวศวิทยาขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสีย้อมผ้าต่อสิ่งแวดล้อมโดยได้หาวิธีการวัดสีที่สามารถเชื่อถือได้มากกว่าวิธีการวัดสีที่มีอยู่ในขณะนั้น โดยมีเกณฑ์ 4 ข้อคือ

1. เป็นหน่วยสีที่สามารถเปรียบเทียบความเข้มสีได้กับทุกชนิดสี
2. สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของค่าสีที่ปริมาณน้อยๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. สัมพันธ์กับค่าจากการวัดสีในหน่วย APHA (American Public Health Association)

4. เครื่องมือที่ใช้ราคาไม่สูงมากนัก

นั่นคือการวัดสีในหน่วยเอซีเอ็มไอต้องทำการวัดโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่านโดยมีหลักการว่า ถ้ามีสีอยู่สองสีเมื่อมองด้วยตาเปล่าแล้วเห็นความแตกต่างของสีจากสภาวะไร้สีในระดับที่เท่ากันแล้วค่าสีทั้งสองสีนี้จะมีค่าเอซีเอ็มไอเท่ากัน

การวัดสีเริ่มจากการหาค่า Tristimulus X, Y, Z ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่านที่ทุกๆ 10 นาโนเมตรในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร (ความยาวคลื่นในช่วงที่ตามนุษย์มองเห็น) คำนวณเป็นค่า Tristimulus Values X, Y, Z โดยทำการตั้งให้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เก็บค่าเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่านตามความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยอัตโนมัติ จากนั้นแปลงค่า x, y, z ให้เป็นค่า Vx, Vy และ Vz โดยสูตรของ McLaren ดังนี้

$$X = 0.98071 (1.2219Vx - 0.23111Vx^2 + 0.23951Vx^3 - 0.021009Vx^4 + 0.0008404Vx^5)$$

$$Y = (1.2219Vy - 0.23111Vy^2 + 0.23951Vy^3 - 0.021009Vy^4 + 0.0008404Vy^5)$$

$$Z = 1.181032 (1.2219Vz - 0.23111Vz^2 + 0.23951Vz^3 - 0.021009Vz^4 + 0.0008404Vz^5)$$

จากนั้นทำการคำนวณค่าความแตกต่างของสี Adams-Nickerson (DE) ด้วยสมการ

$$DE = [(0.23\Delta Vy^2) + \{\Delta (Vx + Vy)\}^2 + \{0.4\Delta (Vy - Vz)\}^2]^{1/2}$$

แล้วทำการแปลงค่า DE ให้เป็นค่าในหน่วยเอซีเอ็มไอโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 2.4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม (Robinson และคณะ, 2001)

### 2.4.1 วิธีทางเคมี

#### 2.4.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ทั่วไปในการกำจัดสีในการกำจัดสีเนื่องจากง่ายในการนำไปใช้ สารออกซิไดซ์ที่ใช้เป็นหลักคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งต้องทำการกระตุ้นด้วยวิธีบางอย่าง เช่น ใช้แสงอัลตราไวโอเลต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกซิไดซ์คือวงแหวนอะโรมาติกของโมเลกุลสี

#### (ก) เฟนตันรีเอเจนต์

เป็นการผสมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก เหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อทำปฏิกิริยากันก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดดิคัล ( $OH^{\bullet}$ ) ซึ่งมีศักย์ออกซิเดชันสูงกว่าคลอรีนเกือบ 2 เท่า และสูงกว่าไอโชนประมาณร้อยละ 15 โดยมีค่าสูงรองจากอนุมูลฟลูออรีน (Fluorine radicle) เท่านั้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสารเคมีเฟนตันกับสีในน้ำเสียคือ

พีเอช อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก และชนิดของน้ำเสียที่ถูกบำบัด

#### (ข) โอโซนเนชั่น

โอโซนเป็นสารที่มีศักย์ออกซิเดชันสูง (2.07) เมื่อเปรียบเทียบกับคลอรีน และสารออกซิไดซ์อื่น การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเหมาะสมในการสลายไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีน ฟีนอล สารฆ่าแมลง และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นองค์ประกอบ การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสีย้อมประมาณได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order rate) โดยสีย้อมที่มีการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นสูงกว่าจะถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่า ปริมาณที่ใช้ขึ้นกับกับสีทั้งหมด และค่าซีโอดีที่ต้องการกำจัด การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนจะทำให้หน้าเสียไม่มีสี และค่าซีโอดีต่ำแต่ค่าบีโอดีกลับเพิ่มขึ้น ไม่เพิ่มปริมาณน้ำเสีย และสลัดจ์ หมูโครโมฟอร์ในสีย้อมโดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์ที่เชื่อมกันด้วยพันธะคู่ซึ่งสามารถทำให้แตกพันธะได้แล้วเกิดเป็นโมเลกุลใหม่ขนาดเล็ก ทำให้สีลดลง โมเลกุลขนาดเล็กเหล่านี้อาจเพิ่มสารก่อมะเร็ง หรือสมบัติที่เป็นพิษ ข้อเสียของการใช้โอโซนคือ โอโซนจะมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 20 นาที ซึ่งมักสั้นไป และยังไม่สามารถลดสีได้หมด เนื่องจากสีย้อมมีเสถียรภาพในสภาพเกลือจึงต้องการ โอโซนอย่างต่อเนื่องต้องเติมโอโซนตลอดเวลา วิธีนี้ยังมีราคาแพง

#### (ค) โฟโตเคมีคอล

วิธีนี้จะลดโมเลกุลของสีลงให้กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยการใช้รังสีอุลตราไวโอเลตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การสลายสีเกิดจากความเข้มข้นของไฮดรอกซีแรดดิคัลที่สูง ( $\text{OH}^\cdot$ ) รังสีอุลตราไวโอเลตจะกระตุ้นสารเคมีและอัตราการกำจัดสีจะขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอุลตราไวโอเลต ค่าพีเอช โครงสร้างของสีย้อม และองค์ประกอบในน้ำย้อม อาจเกิด เฮไลต์ โลหะ กรดอินทรีย์ ออร์แกนิกแอลดีไฮด์ และ กรดอินทรีย์ ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่เกิดสลัดจ์ และกลิ่นลดลง

#### (ง) โซเดียมไฮโปคลอไรต์

วิธีนี้คลอไรต์จะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่หมู่อะมิโนของโมเลกุลสีย้อม จะทำให้เกิดการกระตุ้น และเร่งการแตกพันธะอะโซ ซึ่งไม่เหมาะสมกับสีย้อมสีจะลดสีได้มากเมื่อคลอไรต์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติกแอมีน

#### (จ) กูเจอร์บิทูลิต (Karcher และคณะ, 2001)

กูเจอร์บิทูลิต ( $\text{C}_{36}\text{H}_{36}\text{N}_{24}\text{O}_{12}$ ) เป็นโพลิเมอร์ที่เป็นวงของไกลโคลูรีล และฟอร์มัลดีไฮด์โครงสร้างมีโมโนเมอร์ของยูเรียที่เรียกว่ายูรีลเป็นส่วนประกอบละลายได้น้อยในน้ำบริสุทธิ์ แต่จะละลายได้มากขึ้นในสถานะที่มีเกลืออยู่ มีความจุในการดูดซับสีย้อมสูง และดูดซับสีย้อมได้หลายชนิด เมื่อดูดซับสีบนสารแล้วจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบ

กับสารที่ยังไม่ได้ดูดซับสี โดยประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของเกลือ กลไกอื่นจะขึ้นกับการรวมกันของประจุบวกในสีย้อมพบว่าไควเลนซ์ไอออนจะมีความแรงในการดูดซับมากกว่าโมโนวาเลนซ์ไอออน และไอออนที่ใหญ่จะมีความแรงในการดูดซับสูงกว่าไอออนขนาดเล็ก การที่คูเคอร์บิทูริลไม่ละลายน้ำในทางอุตสาหกรรมนั้นไม่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับตัวกรองแบบอยู่กับที่ได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือมีราคาแพง

### (ค) วิธีเคมีไฟฟ้า

จะใช้สารเคมีเพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่ใช้เลยในการกำจัดสี ไม่เกิดสลัดจ์ สารที่เกิดขึ้นไม่เป็นอันตราย และปลอดภัยสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในการกำจัดสีที่มีความเข้มข้นสูง ต้นทุนค่าไฟฟ้าถูกเมื่อเปรียบเทียบกับราคาสารเคมี

หลักการการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ จะสร้างเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) จากขั้วอิเล็กโทรดเหล็กกล้าที่ใช้ ดังนั้นเมื่อปล่อยน้ำเสียผ่านการบำบัดออกจากระบบจึงต้องปรับค่าพีเอชให้เป็นค่ามากกว่า 11 เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และผ่านกระบวนการกรองอีกขั้นหนึ่ง โดยอาจใช้โพลีเมอร์ช่วยในการตกตะกอนด้วย

#### 2.4.1.2 กระบวนการรีดักชัน

หลักการของวิธีรีดักชันคือใช้การลดวาเลนซ์ของอ็อกซิเจนมลสาร โดยใช้สารเคมี ชนิดรีดิวซ์ซิงเอเจนต์ ได้แก่ ไทโอยูเรียไดออกไซด์ (Thiourea dioxide) หรือที่รู้จักในชื่อของฟอร์มามิดีน ซัลฟินิก แอซิด (Formamidine sulfinic acid, FAS) โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}_3$ ) โซเดียมไบซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{HSO}_3$ ) โซเดียม เมตะไบซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ( $\text{NaHS}$ ) มีการศึกษาเกี่ยวกับการรีดักชันของสีชนิดอะโซ โดยสีดังกล่าวถูกสลายให้มีโมเลกุลเล็กลงเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกอะมีน สารประกอบที่เกิดขึ้นดังกล่าว หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะเป็นพิษมากกว่าตัวสีย้อมเอง จึงได้มีการวิจัยเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยกำจัดน้ำเสียที่ผ่านการรีดักชันด้วยสารเคมีด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก

### 2.4.2 วิธีทางกายภาพ

#### 2.4.2.1 การดูดซับ

เทคนิคการดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษให้คุณภาพสูง และเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ การลดสีเกิดจากกระบวนการ 2 อย่าง คือ การดูดซับและการแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งเกี่ยวข้องกับแฟกเตอร์ทางกายภาพ-เคมี เช่น สีย้อม พื้นที่ผิวการดูดซับ ขนาดอนุภาค อุณหภูมิ ค่าพีเอช และเวลาสัมผัส

### (ก) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ใช้กันโดยทั่วไปซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการดูดซับ สีประจุบวก สีมอร์แคนท์ และสีแอสซิด และสามารถดูดซับได้เล็กน้อยสำหรับสีดิสเพอร์ส สีไดเรกต์ สีเวิร์ด พิกเมนต์ และสีรีแอคทีฟ ขึ้นกับชนิดคาร์บอนที่ใช้ และลักษณะของน้ำเสีย อัตราการลดสีสามารถปรับปรุงได้ด้วยการใช้คาร์บอนในปริมาณมาก ถ่านกัมมันต์มีราคาแพงจึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพซึ่งจะทำให้การดูดซับลดลง 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์

### (ข) การดูดซับด้วยถ่านลอย และถ่านหิน

ถ่านลอยที่ความเข้มข้นสูงเพิ่มขึ้นจะเพิ่มอัตราการดูดซับมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิว

### (ค) การดูดซับด้วยซิลิกาเจล

เหมาะสมในการกำจัดสีเบสิกแต่ไม่เหมาะสมในเชิงอุตสาหกรรม

### (ง) วัสดุอื่นๆ

เช่น ดินเหนียว ชังข้าวโพด เปลือกข้าวสาร ฯลฯ ในการกำจัดสีข้อมีราคาถูกเมื่อเทียบกับถ่านชาร์โคล เนื่องจากมีราคาถูกมากจึงไม่จำเป็นต้องฟื้นฟูสภาพ

### (จ) การกรองด้วยเมมเบรน

วิธีนี้สามารถแยกสีได้อย่างต่อเนื่องจากน้ำเสีย ทนต่ออุณหภูมิ และไม่มีสารเคมี ไม่มีผลต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ความเข้มข้นของสีที่เหลือหลังจากการกรองจะเกิดปัญหาในเรื่องการฝังกลบ และเป็นวิธีที่ต้นทุนสูง มีโอกาสอุดตันและการเปลี่ยนเมมเบรนใหม่ไม่คุ้มค่า เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำๆ แต่ไม่เหมาะในการลดของแข็งที่ละลายน้ำ

### (ฉ) การแลกเปลี่ยนประจุ

การแลกเปลี่ยนประจุเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสีที่มีประจุบวกและลบได้แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในการบำบัดสีในน้ำเสียเนื่องจากแนวคิดนี้ไม่สามารถใช้ได้ในช่วงกว้าง และเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง ทั้งน้ำเสียที่เกิดขึ้นหลังการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) และสารแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange resin) ก็ยังกลับมาเป็นปัญหาของแข็งละลายน้ำสูงอยู่ดี

### (ช) การทำให้เกิดตะกอน

วิธีทำโดยการเติมสารตกตะกอนได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกคลอไรด์ เฟอร์รัสซัลเฟต และเฟอร์ซัลเฟต พบว่ากำจัดสีไดเรกต์ได้ดีมาก แต่ไม่สามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้ ต้องอาศัยสารช่วยในการตกตะกอน (ขนิษฐา เจริญลาภ, 2544) ความเข้มข้นสูงสุดที่เกิดการรวมตะกอนขึ้นอยู่กับประจุของสีข้อมในสารละลายและมีปัญหาในเรื่องการกำจัดสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งจะทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนในการฝังกลบ

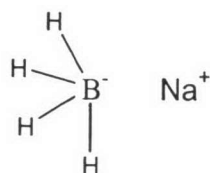
### 2.4.3 วิธีทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นสองหลังจากผ่านการบำบัดขั้นต้น การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีหน้าที่หลักคือ กำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่จะทำการย่อยสลาย และเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศ และจะได้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งมีวิธีต่างๆ กัน ได้แก่ ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบชุดสัมผัสหมุนชีวภาพหรืออาร์บีซี (Rotation Biological Contractors, RBC) และระบบบำบัดแบบไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก (Anaerobic Treatment) เป็นต้น โดยระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะใช้กระบวนการแอนแอโรบิก ในการทำปฏิกิริยารีดักชันสีย้อมหม้อมะไซทำให้เกิดสารประกอบอะโรมาติกอะมีนซึ่งสามารถบำบัดต่อด้วยระบบแอโรบิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.5 โซเดียม โบโรไฮไดรด์

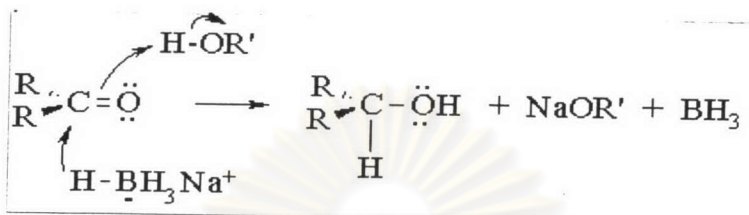
โซเดียม โบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์อย่างแรงที่มักใช้กันในรูปของสารละลาย และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยผลิตได้จาก แร่บอแรกซ์ โซเดียม โบโรไฮไดรด์ที่ใช้ในทางการค้านั้นผลิตขึ้นในช่วงต้นปี 2503 โดยเวอร์ทรอน คอปเปอร์เซ็น ซึ่งปัจจุบันได้กลายเป็นบริษัทมอร์ตันอินเตอร์เนชันแนล กระบวนการผลิตโซเดียม โบโรไฮไดรด์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกกับเมธานอล เพื่อให้เกิด ไตรเมทิลบอเรต ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮไดรด์สูง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ โซเดียม โบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการได้อีก นอกจากนั้นยังมีสารปนเปื้อนอื่นๆ และน้ำมันซึ่งจะถูกกำจัดในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ การใช้งานโซเดียม โบโรไฮไดรด์ในสภาวะที่มีอากาศและความชื้น จะไม่เป็นอันตรายกับผู้สัมผัสเมื่อเปรียบเทียบกับบอเรนตัวอื่นๆ ลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ละลายน้ำได้ และจะมีความเสถียรถ้าอยู่ในสภาวะต่าง แบ่งเป็น 3 แบบคือ แบบแกรนูลา ขนาด 10 ถึง 40 เมช แบบเพลเล็ต ขนาด 7/16 นิ้ว และ แบบผง (มณีรัตน์ องค์กรบรรณคดี, 2542)

การใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์เพื่อรีดิวซ์ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องใช้ปริมาณสูงกว่าปริมาณตามค่าสตอยชิโอเมตริกเนื่องจากอาจมีสารประกอบอื่นที่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ด้วยโบโรไฮไดรด์



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของโซเดียม โบโรไฮไดรด์ (Bochet's group, 2003)

สารรีดิวซ์โซเดียม โบโรไฮไดรด์เป็นแหล่งของไฮไดรด์ ( $H^-$ ) ซึ่งจะใหไฮโดรเจนอออนแก่สารที่ทำปฏิกิริยาด้วย สามารถรีดิวซ์สารละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ หรือแอลกอฮอล์ได้ดังตัวอย่างของปฏิกิริยาการแทนที่หมู่คาร์บอนิลใน คีโตนโดยใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ในรูปที่ 2.2 แสดงถึงกลไกการรีดิวซ์แอลดีไฮด์ด้วยโซเดียม โบโรไฮไดรด์



รูปที่ 2.2 กลไกการรีดิวซ์แอลดีไฮด์ด้วยโซเดียม โบโรไฮไดรด์ (McMaster University, 1998)

### 2.5.1 การใช้งาน (Pioneer magazine, 1997)

การใช้งานโซเดียม โบโรไฮไดรด์ในปัจจุบันสรุปได้ดังนี้

#### 2.5.1.1 ใช้ในการควบคุมมลพิษ

โซเดียม โบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์ที่ใช้ในการกำจัดโลหะออกจากรน้ำเสียอุตสาหกรรม หรือกระบวนการตกแตงผิวโลหะ เช่น อุตสาหกรรมถ่ายภาพและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพน้ำที่บำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐาน และโลหะที่แยกออกได้ในรูปของธาตุมากกว่ารูปเชิงซ้อน ซึ่งเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) ในขณะเดียวกันก็จะเป็นการลดปริมาณของสลัดจ์ได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยเพอร์สซัลเฟต นอกจากนี้ยังพบว่าสารละลายโซเดียม โบโรไฮไดรด์ในชื่อการค้าคือ เวเนเม็ทของ บริษัทมอร์ดันสามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยโลหะมีค่า และโลหะหนัก ซึ่งมีความคุ้มค่าทั้งในเชิงประสิทธิภาพ และต้นทุนในการนำกลับมาใช้ใหม่ของโลหะทองแดงจากรน้ำเสียในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (Printed circuit board ; PCB) สำหรับโลหะในกลุ่มของทองคำ เงิน และแพลททินัมในน้ำเสียชุบโลหะ และอุตสาหกรรมอื่น พบว่ามีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน และยังเป็น การลดต้นทุนของกระบวนการพร้อมไปกับการรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้ในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมภาพถ่าย ยังมีโลหะเงินปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเมื่อพิจารณาถึงมูลค่าแล้วนับเป็นการคุ้มค่าที่จะนำโลหะเงินจากรน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยการใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถดึงโลหะเงินออกจากรน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมภาพถ่ายได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (The North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance, 2004)



### 2.5.1.2 ใช้ในกระบวนการฟอกกระดาษ

ในกระบวนการฟอกกระดาษ จะใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์เพื่อสร้างไฮโดรซัลไฟด์ ในกระบวนการทำกระดาษ ซึ่งไฮโดรซัลไฟด์นี้จะทำหน้าที่ฟอกสีลิกนินในเนื้อไม้ เพราะลิกนินเป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการผลิตกระดาษเพราะจะทำให้กระดาษเป็นสีน้ำตาล การใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ในอุตสาหกรรมกระดาษเพราะมีข้อได้เปรียบหลายอย่าง เช่น ทำให้กระดาษดูดซับหมึกพิมพ์ได้ดี ทึบแสง เนื้อแน่น และมีต้นทุนต่ำกว่าการฟอกด้วยวิธีอื่น

### 2.5.1.3 ใช้ในการผลิตสารเคมี

ในกระบวนการผลิตสารเคมีโบโรไฮไดรด์จะถูกใช้เพื่อลดสารเจือปน ความคมสี กลิ่น และความเสถียรของสารอินทรีย์เคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้กำจัดสารเจือปนพวกคาร์บอนิลเปอร์ออกไซด์ และสารประกอบโลหะในกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ ไกลคอล อะมีน ตลอดจนอีเธอร์

#### 2.5.1.4 ใช้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Kojima และคณะ, 2004)

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) จะเป็นแหล่งพลังงานที่ถูกกระตุ้นด้วย ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และ ออกซิเจน ( $O_2$ ) พลังงานที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจน และออกซิเจนซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ไฮโดรเจนสามารถเก็บไว้ในรูปของโซเดียม โบโรไฮไดรด์ การที่โซเดียม โบโรไฮไดรด์ประกอบด้วยไฮไดรด์ถึง 4 อะตอม ซึ่งสามารถรีดิวซ์น้ำ ( $H_2O$ ) ให้กลายเป็นไฮโดรเจนได้

เมื่อโซเดียม โบโรไฮไดรด์ทำปฏิกิริยากับน้ำที่ขั้วแอโนดจะให้ไฮโดรเจนดังสมการ



พบว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากเพราะสามารถผลิตไฮโดรเจนจากน้ำได้โดยจะได้ไฮโดรเจน 8 อะตอมจาก 4 อะตอมของโซเดียม โบโรไฮไดรด์ ซึ่งไฮโดรเจนจะสร้างขึ้นที่ขั้วแอโนดและสามารถนำไปใช้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ทันที แต่อย่างไรก็ตามที่อิเล็กโทรดขั้วแอโนดโซเดียม โบโรไฮไดรด์จะทำปฏิกิริยาโดยตรงซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนดังสมการ



เมื่อใช้โบโรไฮไดรด์ในรูปของพลังงานแล้วจะกลายเป็นสารละลายบอเรตโดยมีองค์ประกอบเหมือนกับบอแร็กซ์ ซึ่งสารละลายบอเรตนี้สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปโบโรไฮไดรด์ได้



### 2.5.1.5 ใช้ผลิตไฮโดรซัลไฟด์เพื่อฟอกสีกระดาษ

ในอุตสาหกรรมฟอกกระดาษจะใช้โบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์ให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยวิธีทางกล (Mechanical pulping process) โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเป็นตัวฟอกสีลิกนินในไม้ สารละลายของโซเดียม โบโรไฮไดรด์หรือที่เรียกว่า Borol สามารถให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็นสองเท่าของน้ำหนักตัวมันเอง และมีต้นทุนที่ถูกกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

### 2.5.2 การผลิตโซเดียม โบโรไฮไดรด์

โซเดียม โบโรไฮไดรด์มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีคุณสมบัติละลายน้ำได้และจะมีความเสถียรถ้าอยู่ในสถานะที่เป็นค้าง ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกกับเมธานอลเพื่อให้ได้ไตรเมทิลบอเรต (Tri-methyl borate) หรือใช้ไดบอเรน (Diborane) ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮไดรด์ (Sodium hydride) หรือโซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium methoxide) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้เกิดโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งพวกเมทิลที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในรูปของเมธานอล ในการผลิตต้องระวังมิให้เกิดการระเบิดจากปฏิกิริยาของเมทิลบอเรตกับโซเดียมไฮไดรด์โดยโบโรไฮไดรด์ที่ผลิตได้จะอยู่ในรูปที่เสถียรในอากาศและความชื้น

ศักย์ภาพในปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี ( $E^0_{298}$ ) ของโบโรไฮไดรด์มีค่าเท่ากับ 1.24 โวลต์ เทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรดมาตรฐาน

### 2.5.3 การใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ในการกำจัดสีข้อม (Cook, 1996)

ปฏิกิริยารีดักชันด้วยโซเดียม โบโรไฮไดรด์ที่มีไบซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวิธีหนึ่งที่มีศักย์ภาพในการกำจัดสีข้อมชนิดละลายน้ำได้ที่มีหมู่อะโซหรือหมู่อื่นที่ถูกรีดิวซ์ได้เป็นสารโครโมฟอร์ และสีข้อมที่มีโลหะทองแดงเป็นส่วนประกอบ

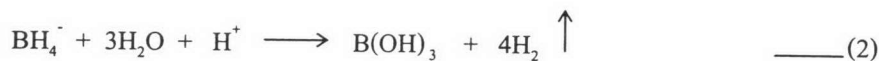
หลักการ คือ โซเดียม โบโรไฮไดรด์จะรีดิวซ์ให้โมเลกุลสีข้อมเล็กลง และเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากสี ซึ่งสามารถนำเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอ็คติเวเตดสลัดจ์ การออกซิไดซ์ด้วยสารเคมี การดูดซับด้วยคาร์บอน หรือการตกผลึกของแข็งด้วยสารตกผลึกที่มีประจุบวก (Polycationic agent) ได้โดยไม่เกิดปัญหาตามมา

สมการการแตกตัวของโซเดียม โบโรไฮไดรด์ในน้ำ เป็นดังนี้

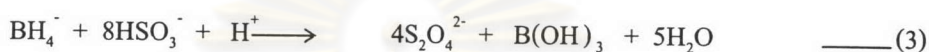


$E^0$  คือ ค่าศักย์ภาพการออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี เทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรดมาตรฐาน ซึ่งมีค่าสูงแสดงว่ามีแนวโน้มการให้อิเล็กตรอนสูง ถือเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี

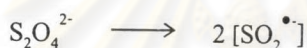
แต่ไม่สามารถนำโซเดียม โบโรไฮไดรด์มาใช้ในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย ได้โดยตรง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พีเอชต่ำกว่าหรือเท่ากับ 8 และมีแนวโน้มที่จะรีดิวซ์ในรูปไฮไดรด์ดังสมการ



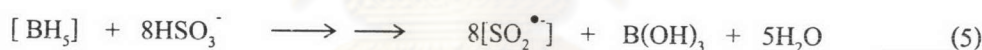
ข้อบกพร่องดังกล่าวแก้ไขได้โดยใช้ไบซัลไฟต์ร่วมกับโบโรไฮไดรด์ซึ่งโบโรไฮไดรด์จะรีดิวซ์ไบซัลไฟต์ให้เป็นไดไธโอไนด์ได้อย่างรวดเร็วในช่วงพีเอช 5 ถึง 8 เมื่อไม่มีสารชนิดอื่นที่ถูกรีดิวซ์ได้ดังนี้



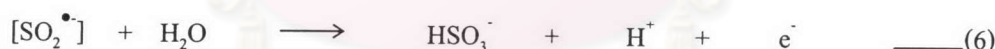
ประสิทธิภาพการผลิตไดไธโอไนด์ ( $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ) โดย  $\text{BH}_4^-$  มีค่าตั้งแต่ 90 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปจากนั้นไดไธโอไนด์สามารถแตกตัวได้เองในทันทีเป็นอนุมูลที่มีประจุลบของ  $\text{SO}_2$  ตามสมการ



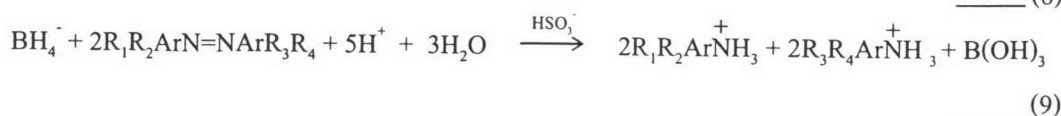
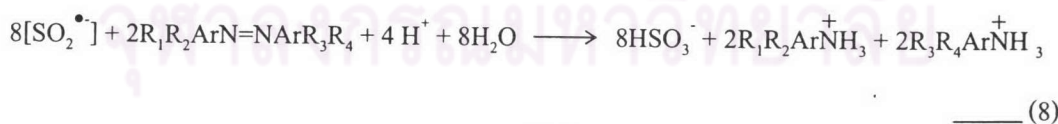
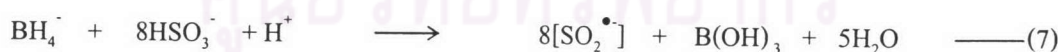
ถึงแม้ว่ากลไกของปฏิกิริยาตามสมการที่ (3) ไม่สามารถระบุได้แน่นอนแต่สรุปได้ว่า  $[\text{BH}_3]$  และ  $[\text{SO}_2^{\bullet-}]$  จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนสารตัวกลาง (Intermediate) ของปฏิกิริยา ดังสมการ



$[\text{SO}_2^{\bullet-}]$  เป็นรีดิวซ์เชิงเอเจนต์อย่างแรง และได้ไบซัลไฟต์เป็นผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกัน



สมการ (4) + (5) ได้ (7)



สมการที่ (9) ได้จากการรวมสมการที่ (7) และ (8) เข้าด้วยกัน และจะเห็นว่าปริมาณไบซัลไฟต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเป็นเพียงตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ โครีเอเจนต์เท่านั้น

Voyksner และคณะ (1993) พบว่าปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดจากไดไฮโดรไอโอดีนหรือดีบุกคลอไรด์ ( $\text{SnCl}_2$ ) อาจทำให้เกิดอะโรมาติกอะมีนจากหมู่อะโซอย่างง่าย แต่ในกรณีของหมู่อะโซที่มีองค์ประกอบซึ่งไวต่อปฏิกิริยารีดักชัน เช่น  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{CO}_2\text{CH}_3$  และ  $-\text{CN}$  จะทำให้เกิดผลผลิตได้หลายชนิด

ข้อเสียของการใช้โบโรไฮไดรด์ที่มีโบซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เมื่อใช้น้ำบดน้ำเสียที่เจือจางของเสียทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณสูงซึ่งมีการปนเปื้อนของโบรอน และอะโรมาติกอะมีนที่อาจเป็นพิษ ยิ่งไปกว่านั้นยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของโบโรไฮไดรด์กับน้ำ และไดไฮโดรไอโอดีนกับออกซิเจนทำให้ความสามารถในการรีดิวซ์เสียลดลง



ดังนั้นกระบวนการนี้ควรใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณน้อยแต่ความเข้มข้นของเสียสูง ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียที่มีเสียโดยรีดักชันด้วยโซเดียม โบโรไฮไดรด์ ถึงแม้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียจริงจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของมลสารที่อยู่ในน้ำเสียแต่กระบวนการโดยทั่วไปจะมีขั้นตอนดังนี้

- (ก) ปรับพีเอชให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 6
- (ข) เติมโบซัลไฟด์ (โดยทั่วไปเท่ากับ 200 ถึง 500 มิลลิกรัม  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ต่อลิตร)
- (ค) เติมสารละลายโบโรไฮไดรด์\* จนกระทั่งมีค่าไออาร์พีเท่ากับ  $-500$  ถึง  $-600$  มิลลิโวลต์ (หรือจนกระทั่งเหลือสีในระดับที่ต้องการ)
- (ง) (ทางเลือก) การเติมสารเคมีประจุบวก (โพลิอะมีน หรือ โคเอกกูแลนซ์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ) ตามด้วยการกรอง
- (จ) การดูดซับด้วยคาร์บอน การออกซิไดซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ หรือบำบัดขั้นสุดท้ายด้วยระบบทางชีวภาพ

หมายเหตุ \* ใช้สารละลายโซเดียม โบโรไฮไดรด์ 1.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเตรียมจากสารละลายที่มีจำหน่าย ซึ่งมีความเข้มข้นของโซเดียม โบโรไฮไดรด์ 12 เปอร์เซ็นต์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์

#### 2.5.4 ความเหมาะสมในทางปฏิบัติของการใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ในกระบวนการกำจัดสี (Decolorization)

กระบวนการนี้ให้ผลที่เสถียรทางเคมี และสร้างผลิตภัณฑ์ คือ กรดบอริกกับ โซเดียม ไบซัลไฟต์ซึ่งเป็นผลพลอยได้ ไบซัลไฟต์ที่เป็นคูรีคอกซ์ของโบโรไฮไดรด์สามารถปล่อยออกโดยไม่จำเป็นต้องมีการบำบัดเพิ่ม (แม้ว่าไบซัลไฟต์จะถูกออกซิไดซ์โดยอากาศเป็นซัลเฟตได้) วิธีบำบัดดังกล่าวเป็นไปได้ทั้งแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง และสามารถใช้ระบบจ่ายโบโรไฮไดรด์อัตโนมัติที่ควบคุมด้วยเครื่องโออาร์พี กระบวนการนี้จะรีดิวซ์สีของมูกูมอะโซที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนไปเป็นหมู่อะมีนที่ไม่ใช้สารโครโมฟอร์ และมีโมเลกุลขนาดเล็กลง หรือในกรณีของสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงจะรีดิวซ์ทองแดงให้ออนไปเป็นโลหะทองแดง สิ่งที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันจะถูกแยกออกในรูปของของแข็ง หรือในกรณีของอะมีนที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาจะถูกดูดซับบนคาร์บอน ออกซิไดซ์หรือบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ

#### 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cook (1996) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ประเภทไดเรกต์ แอซิด และรีแอคทีฟ โดยทั้งหมดประกอบด้วยโครงสร้างทางเคมีของหมู่อะโซซึ่งทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยโบโรไฮไดรด์ที่มีไบซัลไฟต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาที่พีเอชเท่ากับ 6 ณ อุณหภูมิบรรยากาศ และทำการเปรียบเทียบระหว่างรีดิวซ์เอเจนต์ อันได้แก่ ไคโรโอไนด์ กับ FAS (Formamidic Sulfonic Acid) ผลการทดลองพบว่า FAS ไม่สามารถลดสีในน้ำเสียได้เลย ในขณะที่โบโรไฮไดรด์สามารถรีดิวซ์พันธะอะโซของสีให้เป็นอะโรมาติกอะมีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง และเป็นการกำจัดสีพร้อมกันไปด้วย สำหรับสีย้อมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบได้ทดลองร่วมกับการใช้สารโคแอกกูแลนต์ประจุบวกตามด้วยโพลีเมอร์ประจุลบ โดยเติมในขณะทำปฏิกิริยา หรือหลังการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสี

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการใช้โบโรไฮไดรด์ที่มีไบซัลไฟต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อรีดิวซ์สีย้อมในน้ำเสียจริงทางอุตสาหกรรมซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของสีย้อมในกลุ่มอะโซตามด้วยการตกผลึกของแข็งด้วยสารโคแอกกูแลนต์ประจุบวก และพบว่าประสิทธิภาพการรีดิวซ์สีมีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ที่พีเอช 5 ถึง 6 ด้วยการเติมไบซัลไฟต์ก่อนหน้า (200 ถึง 500 มิลลิกรัมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ต่อลิตร) หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายต่างของโซเดียม โบโรไฮไดรด์ในปริมาณมากกว่าทฤษฎีเพียงเล็กน้อยจากค่าสตอยชิโอเมตริก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเสถียรอยู่ที่พีเอช 5.5 ถึง 7.0

Larson และคณะ (1996) ศึกษาการกำจัดสารประกอบไนโตรอะโรมาติก 4 ชนิด ได้แก่ 1,3-ไดไนโตรเบนซีน (DNB), 2,4-ไดไนโตรโทลูอิน (DNT) 2,4-ไดไนโตรเบนซีนซัลโฟนิคแอซิด (DNBSA) และ 2,4-ไดไนโตรโทลูอิน-3-ซัลโฟนิคแอซิด (DNTSA) โดยใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ ในสถานะที่เป็นค่าปริมาณมากเกินพอร่วมกับการสัมผัสแสงอุลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 280 นาโนเมตร ภายใต้สภาวะ 4 สภาวะ คือ การเกิดปฏิกิริยาในที่มืด การเกิดปฏิกิริยาภายใต้แสง การเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะไร้อากาศ และการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะมีอากาศ แล้วทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดักชันทางเคมีด้วยโซเดียม โบโรไฮไดรด์โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวที่มีสมรรถนะสูงเทียบกับสารมาตรฐาน และยืนยันผลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลการทดลองพบว่าเกิดการสลายตัวของสารไนโตรอะโรมาติกได้มาก นอกจากนี้ยังเกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาดีในเตรซัน ดีซัลโฟเนซัน รีดักชัน และการควบแน่นขึ้นด้วย โดยปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันเกิดขึ้นจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโบโรไฮไดรด์ไปยังสารประกอบไนโตรอะโรมาติก ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นภายใต้การทำปฏิกิริยาในสภาวะต่างๆ มีหลายชนิด ได้แก่ สารประกอบ 3-ไนโตรแอนนิลีน อะโซ อะซอกซี 2-เมทิล-5-ไนโตรแอนนิลีน 4-เมทิล-3-ไนโตรแอนนิลีน 3,3'-ไดฟีนิลเอมีน 3,3'-ไดไนโตรไดฟีนิลเอมีน ไดไนโตรไดเมทิลอะโซ และไดไนโตรไดเมทิลอะซอกซี เป็นต้น นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอล พบว่าในสภาวะที่มีแสงจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าในสภาวะไม่มีแสงเพราะออกซิเจนจะลดอัตราการสลายตัวของสารประกอบไนโตรอะโรมาติก เนื่องจากเป็นตัวขัดขวางการเกิดสภาวะที่ถูกกระตุ้นและอนุมูลอิสระ ทั้งยังเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาต้องกำจัดออกซิเจนให้หมด

ปวีณา ณะสังข์ (2539) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ (สารผสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟอร์รัสซัลเฟต) เปรียบเทียบกับสารรีดิวซ์คือ โซเดียมไฮโครซัลไฟต์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ของ สีเบสิก สีแอซิด สีไคเรทท์ และสีรีแอคทีฟ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าในการกำจัดสีด้วยโซเดียมไฮโครซัลไฟต์นั้นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับสีไคเรทท์ สีแอซิด สีรีแอคทีฟ สีเบสิก คือ พีเอช 4 พีเอช 4 พีเอช 4 ถึง 9 และพีเอช 9 ตามลำดับ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเป็น 97 ถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์ 97.3 ถึง 98.4 เปอร์เซ็นต์ 84.2 ถึง 96.0 เปอร์เซ็นต์ และ 91.4 ถึง 99.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการกำจัดสีด้วยเฟนตันรีเอเจนต์พบว่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4 ถึง 9 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีไคเรทท์ รีแอคทีฟ แอซิด และเบสิก เป็น 90.7 ถึง 98.0 เปอร์เซ็นต์ 96.1 ถึง 97.9 เปอร์เซ็นต์ 87.0 ถึง 97.2 เปอร์เซ็นต์ และ 89.1 ถึง 99.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การกำจัดน้ำเสียจริงที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งมาแล้ว โดยใช้โซเดียมไฮโครซัลไฟต์ จะใช้เวลาในการกวนเร็ว 20 นาที พีเอชที่เหมาะสมเป็น 4 ถึง 5 และใช้เวลาในการ

ตกตะกอน 30 นาที ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอมีค่า 65.6 ถึง 79.8 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าซีไอลดลง 42.4 ถึง 49.8 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นค่าสารเคมี 8.55 ถึง 10.66 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และสำหรับการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ใช้เวลาทวนซ้ำ 20 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 20 นาที พีเอชที่เหมาะสม 4 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอสูงกว่าการใช้โซเดียมไฮโครซัลไฟด์ คือ 82.5 ถึง 94.4 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นค่าสารเคมีในการบำบัด 5.94 ถึง 9.55 บาทต่อลูกบาศก์เมตร นั่นคือในน้ำเสียจริงการนำโซเดียมไฮโครซัลไฟด์มาใช้ยังให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจเท่ากับการบำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์

**Laszlo (1997)** พบว่าเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอเทอร์ไนซ์เซลลูโลส และควอเทอร์ไนซ์ลิกโนเซลลูโลสที่อิมมัลชันด้วยสีย้อมซึ่งมีหมู่ โมโนอะโซ ได้แก่ สีแอซิดออเรนจ์ 7 และ สีรีแอกทีฟเรด 180 สามารถฟื้นสภาพได้โดยการทำลายพันธะอะโซในสีย้อมโดยปฏิกิริยารีดักชันด้วยคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ โปแตสเซียม โบโรไฮไดรด์ และ โซเดียมไบซัลไฟด์ ( $\text{KBH}_4/\text{NaHSO}_3$ ) ซึ่งสามารถฟื้นคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนประจุได้มากกว่า 74.เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โซเดียมเปอร์คลอเรตจะทำให้คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุเพิ่มขึ้นได้ถึง 95.เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถนำเซลลูโลสกลับมาใช้ใหม่ได้ และจากผลการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวที่มีสมรรถนะสูง (HPLC) เพื่อยืนยันการแตกพันธะอะโซ พบว่าโปแตสเซียม โบโรไฮไดรด์ และ โซเดียมไบซัลไฟด์สามารถรีดิวซ์สีย้อม โดยแตกพันธะอะโซของสีย้อมได้แสดงให้เห็นว่าการรีดักชันเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดสีในน้ำเสียจากการฟอกย้อม

**ฉาไลตา เนียมมณี (2542)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อม C.I. Reactive Red 2 ด้วยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้แบคทีเรียเด่นในกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการนี้สามารถกำจัดสีและซีไอได้โดยเวลากักแอนแอโรบิกที่กำจัดสีได้ดีที่สุดคือ 30 ชั่วโมง ซึ่งการกำจัดสีจะเกิดขึ้นในขั้นตอนแอนแอโรบิกเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อใช้เครื่องยูวี-วิลลิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ทดลองหาค่าอะนีสีนพบว่าในขั้นตอนนี้จะเกิดอะนีสีนซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติกอะมีนขึ้นด้วยซึ่งย่อยสลายได้ยากในสภาวะแอนแอโรบิก แต่แบคทีเรียสามารถกำจัดอะนีสีนให้หมดไปเมื่อผ่านขั้นแอโรบิก

**บุษรา ประชุมญาติ (2545)** ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียม โบโรไฮไดรด์ เปรียบเทียบกับโซเดียมไฮโครซัลไฟด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้สีรีแอกทีฟ 3 โทนสี ได้แก่ C.I. Reactive Black 5, C.I. Reactive Red 180 และ C.I. Reactive Blue 171 ซึ่งมีหมู่อะโซเป็นไคอะโซ โมโนอะโซ และไดอะโซ ตามลำดับ โดยเตรียมน้ำเสียที่ความเข้มข้น 50 70 90 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ และ โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ทำการสลายหมู่อะโซโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ กันและแปรค่าพีเอชเริ่มต้น แล้วหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วย

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ด้วยวิธี เอสยู และ เอ็ดเอ็มไอ ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ พีเอช 10. แต่ถ้าพีเอชเริ่มต้นเป็นกรดจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ระหว่างโซเดียม โบโรไฮไดรด์กับน้ำทำให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีลดต่ำลง ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร คือมีประสิทธิภาพมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารเคมีสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 5 เท่า และ 7 เท่าของสตอยชิโอเมตริกทำให้ปฏิกิริยารีดักชันดีที่สุดให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าเมื่อใช้ปริมาณสารเคมีน้อยๆ ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดกรดบอริกซึ่งละลายน้ำได้ดีไม่เกิดสตัคจันในกระบวนการบำบัด แต่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียออกจากระบบลดต่ำลง น้ำเสียสี C.I. Reactive Black 5 และ C.I. Reactive Blue 171 ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 70 มิลลิกรัมต่อลิตรต้องใช้ปริมาณที่เหมาะสมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ 28 เท่าของสตอยชิโอเมตริก จึงจะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 70 มิลลิกรัมต่อลิตรต้องการปริมาณโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์เพียง 14 เท่า และสารรีดิวซ์โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เหมาะสมในการบำบัดเฉพาะสีข้อม C.I. Reactive Red 180 และน้ำเสียสีข้อมที่มีความเข้มข้นต่ำๆ แต่ไม่เหมาะกับสี C.I. Reactive Black 5 และ C.I. Reactive Blue 171 และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีข้อมสูงกว่า 90 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการใช้โซเดียม โบโรไฮไดรด์ร่วมกับเมตาไบซัลไฟด์จะไม่มิกลิ้นเหม็นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไม่เกิดตะกอนแขวนลอย และเมื่อใช้โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในการรีดิวซ์สีข้อมพบว่า โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เหมาะสมในการบำบัดสีข้อม C.I. Reactive Red 180 และน้ำเสียที่มีสีข้อมความเข้มข้นต่ำๆ โดยค่าสีคงเหลือในน้ำเสียเพิ่มขึ้นเร็วกว่าน้ำเสียที่บำบัดด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์

**Ghoreishi และ Haghghi (2003)** ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยระบบผสมระหว่างการรีดักชันกับวิธีทางชีวภาพ โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของการรีดักชัน และส่วนออกซิเดชันด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ซึ่งสิ่งที่ศึกษาได้แก่ สีแอซิด สีดิสเพอร์ส สีดเรกท์ สีเบสิก และสีรีแอคทีฟ ซึ่งในส่วนของ การรีดักชันใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ และโซเดียม โบโรไฮไดรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและรีดิวซ์เอเจนต์ตามลำดับ พีเอชเริ่มต้น 8.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมระยะเวลาสัมผัส จากนั้นทำการตรวจสอบสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยอินฟาราดและอูลตราไวโอเลตสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าโซเดียม โบโรไฮไดรด์สามารถกำจัดสีได้ถึง 81 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์โดยไม่เกิดตะกอน ปริมาณของไบซัลไฟด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสมเป็น 50 ถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 200 ถึง 520 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีอินฟาราดสเปกโตรสโคป พบว่าในขั้นของการทำปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยารีดักชันนั้นสีที่ไม่สามารถย่อย

สลายทางชีวภาพได้จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลังจากการรีดักชันไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้เช่น อัลคิล และ อัลคีน ส่งผลให้ค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้สัดส่วนระหว่างค่าซีโอดีต่อบีโอดีต่ำลง แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำน้ำเสียที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปบำบัดด้วยระบบชีวภาพเนื่องแบคทีเรียแบบใช้อากาศสามารถออกซิไดซ์สารได้อย่างสมบูรณ์

หลังจากบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบผสมระหว่างการรีดักชันกับวิธีทางชีวภาพพบว่าค่าซี ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าลดลงเป็น 78 ถึง 88 เปอร์เซ็นต์ 97 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ 76 ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ และ 92 ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบผสมจะสามารถบำบัดได้ในขั้นตอนของการรีดักชัน จากนั้นค่าซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดจะถูกกำจัดในขั้นของวิธีทางชีวภาพ

**ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2546)** ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิดโมโนอะโซ โมโนอะโซที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก ไคอะโซ และ แอนทราควิโนนจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ S1 กับ A5 พบว่าการใช้แบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์สามารถรีดิวซ์สีอะโซภายนอกเซลล์ได้โดยปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสีย้อมอะโซจะถูกกำจัดในขั้นแอนแอโรบิก ในขณะที่ค่าซีโอดีถูกกำจัดในขั้นแอโรบิก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย