

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตอนที่ 1 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อ ดังนี้

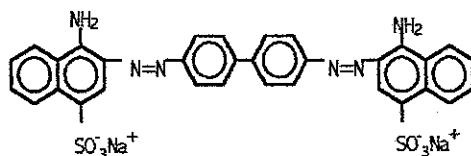
1. สีย้อมอุตสาหกรรม : การจำแนกและโครงสร้างโมเลกุล
2. กระบวนการผลิตสีย้อมอุตสาหกรรม
3. อันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษของสีย้อมอุตสาหกรรม
4. ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของสีย้อมอุตสาหกรรม
5. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีย้อม
6. กลไกและวิธีการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซโดยจุลินทรีย์

ตอนที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะและโครงสร้างของสีย้อมอุตสาหกรรม

สีย้อมโดยส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของโมเลกุลที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ พันธะคู่สลับ (conjugated double bonds) โครโมฟอร์ (chromophore) และออคโซโครม (auxochromes) ซึ่งทั้งโครโมฟอร์และออคโซโครมจะเชื่อมต่ออยู่กับพันธะคู่สลับ ทำให้เรียกรวมทั้ง 3 ส่วนนี้ว่า โครโมเจน (chromogen) ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสีย้อม (ลิลี โกศัยยานนท์, 2541) เช่น สี congo red 1 (ภาพที่ 2)

การจำแนกชนิดของสี (dye classification) มีด้วยกันหลายระบบ เช่น จำแนกตามแหล่งกำเนิด ตามกลุ่มเคมีภายในโครงสร้างหรือการใช้งาน ระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเป็นระบบที่ใช้ในดัชนีสี (colour index) ที่แบ่งตามการใช้งานดังนี้ (ลิลี โกศัยยานนท์, 2541)



congo red

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของสีย้อม congo red 1 (โมเดอร์น ไคสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

สีย้อมกรด (acid dyes) สีย้อมกลุ่มนี้บางครั้งรู้จักกันในอีกชื่อคือ anionic dyes เนื่องจากส่วนมากมีโครงสร้างเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ได้แก่ กรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) ที่ละลายในน้ำได้ และให้ประจุลบ สีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ใช้เป็นสีหลักในการย้อมเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ ได้แก่ ขนสัตว์ ไหม และเส้นใยพอลิเอไมด์ (polyamide) ซึ่งเส้นใยเหล่านี้เป็นเส้นใยที่มีหมู่อะมิโนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสีได้

สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แนปทอล (naphthol) เกิดจากการรวมกันของสารประกอบ 2 ชนิดที่ต่างก็ละลายน้ำได้ กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นที่ไม่ละลายน้ำ สารประกอบทั้ง 2 ชนิดนี้ ได้แก่ แนปทอล หรือ coupling component และเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) สำหรับการใช้งานโดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้ในการย้อม เส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเอสเตอร์ (polyester) และ ไตรอะซีเตต (triacetate) เนื่องจากมีความคงทนต่อการซักและแสงแดดเป็นอย่างดี

สีย้อมเบสิก (basic dyes) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า cationic dyes เนื่องจากเป็นสีที่ให้ประจุบวกเมื่อแตกตัวในน้ำย้อม และส่วนที่เป็นประจุบวกของสีเป็นส่วนที่เกิดพันธะกับเส้นใย ลักษณะเด่นของสีย้อมกลุ่มนี้คือมีความสดใสสูง แต่มีความคงทนต่อแสงต่ำ การละลายของสีย้อมกลุ่มนี้จะละลายได้ดีในแอลกอฮอล์แต่จะละลายน้ำได้ยาก ส่วนใหญ่มีความเป็นพิษสูง

สีย้อมตรง (Direct dyes) เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้และแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาพสารละลาย มีแรงยึดกับเส้นใยเซลลูโลสเป็นอย่างดี ในการย้อมจำเป็นต้องอาศัยโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟต สำหรับช่วยในการย้อมด้วย สำหรับการย้อมติดของสีย้อมกลุ่มนี้เกิดมาจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาล

สีย้อมแวต (vat dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ก่อนทำการย้อมจะต้องทำการรีดิวซ์ก่อน โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปลิวโคที่สามารถละลายน้ำได้ (water soluble leuco) ซึ่งเป็นรูปที่มีแรง

ยึดเหนี่ยวกับเส้นใย จากนั้นจึงทำการออกซิไดส์ให้ได้รูปที่ไม่ละลายน้ำกลับคืนมา

สีย้อมกระจาย (disperse dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องได้น้อยมากแต่สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี มีแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเอสเตอร์ สีย้อมกระจายจัดเป็นสีที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมากนัก ส่วนใหญ่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 150 – 250 องศาเซลเซียส และระเหิดได้โดยไม่สลายตัว การละลายของสีชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

สารสี (pigments) ประกอบด้วยชนิดที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ยึดติดกับเส้นใยโดยใช้กาวพอลิเมอร์ (polymeric binders) เป็นตัวเชื่อมโดยวิธีจุ่มอัด (padding) ทำให้แห้งและใช้ความร้อนสูงทำให้เกิดการยึดติดตามลำดับ นอกจากนี้สารสียังสามารถใช้ในการพิมพ์ผ้าที่ทำจากเส้นใยได้ทุกชนิด

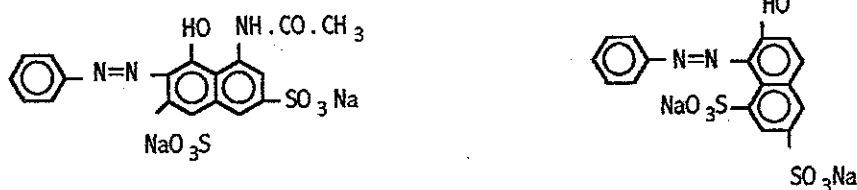
สีรีแอคทีฟ (reactive dyes) เป็นสีที่มีประจุลบที่สามารถละลายน้ำได้ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลส ได้พันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสีไดเรกต์กับเส้นใยเซลลูโลสมาก จึงมีความคงทนต่อการซักดีกว่า

สีซัลเฟอร์ (sulphur dyes) เป็นสีที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ในสภาพปกติไม่ละลายน้ำ แต่สามารถใช้สารรีดิวซ์เปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำในสภาวะต่างได้ ซึ่งเป็นรูปที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยเซลลูโลส หลังจากทำการย้อมแล้วต้องทำการออกซิไดส์ให้ได้รูปที่ไม่ละลายน้ำกลับคืนมาภายในเส้นใย

สำหรับน้ำเสียและสีย้อมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาทดลองนี้ได้มาจากโรงงาน Modern Dyestuffs & Pigments ซึ่งเป็นโรงงานที่ทำการผลิตสี 3 กลุ่มหลัก ๆ คือ สีแอซิด สีไดเรกต์ และสีรีแอคทีฟ โดยมุ่งเน้นผลิตสีกลุ่มแอซิดเป็นส่วนใหญ่ คือ มีการผลิตมากกว่าร้อยละ 75 ของสีที่ผลิตทั้งหมด สำหรับลักษณะโครงสร้างที่สำคัญของสีทุกกลุ่มที่โรงงานทำการผลิตจะประกอบไปด้วยพันธะหลัก คือพันธะอะโซ (-N=N-) นอกจากนี้ในแต่ละกลุ่มดังกล่าว สียังแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตามลักษณะโครงสร้างที่สำคัญได้ดังนี้

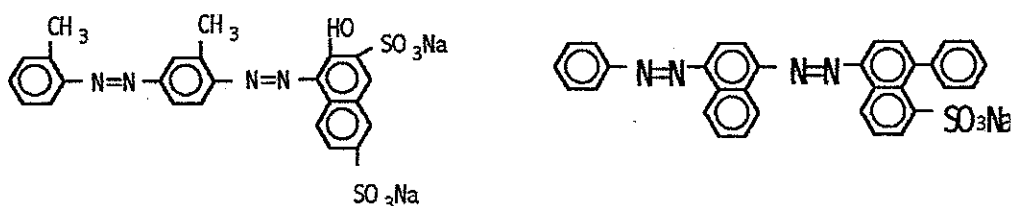
1. สีแอซิด แบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่

1.1 Monoazo เป็นสีกลุ่มที่มีพันธะอะโซ 1 ตำแหน่ง ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างกรดซัลโฟนิกภายในโมเลกุลของสีย้อม ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างโครงสร้างของสีแอซิดกลุ่ม monoazo (ไมเดอร์น ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

1.2 Diazo เป็นสีกลุ่มที่มีพันธะอะโซ 2 ตำแหน่ง ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างกรดซัลโฟนิกภายในโมเลกุลของสีย้อม ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวอย่างโครงสร้างของสีแอซิดกลุ่ม diazo (ไมเดอร์น ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

สีแอซิดนี้ยังเป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อว่า anionic dyes เนื่องจากส่วนมากมีโครงสร้างเป็นเกลือไฮเดียมของกรดอินทรีย์คือ กรดซัลโฟนิก ที่ละลายในน้ำได้และให้ประจุลบ โดยส่วนใหญ่สีแอซิดจะใช้เป็นสีหลักในการย้อมเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ ได้แก่ ขนสัตว์และไหม และเส้นใยพอลิเอไมด์ ได้แก่ ไนลอน (nylon) ซึ่งเส้นใยเหล่านี้จะมีหมู่อะมิโนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสีได้ (Trotman, 1970) นอกจากนั้นถ้าแบ่งสีแอซิดนี้ตามการมีโลหะเป็นองค์ประกอบ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

1.1 Non-metallic acid dyes เป็นสีแอซิดกลุ่มไม่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถแบ่งตามสถานะในการย้อมได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1.1.1 Levelling dyeing acid dye เป็นกลุ่มสีแอซิดที่เส้นใยดูดซึมได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดแก่ โดยการเติมกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก ลงไปให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 2 – 3 สีกลุ่มนี้จึงมีความคงทนต่อแสงค่อนข้างดีแต่มีความคงทนต่อการซักต่ำ

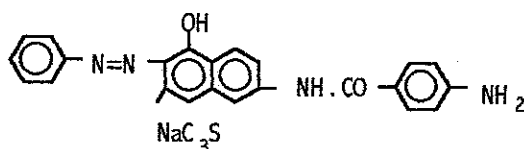
1.1.2 Milling acid dye เป็นกลุ่มสีที่เส้นใยดูดซึมได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน โดยทำการปรับความเป็นกรดต่างให้อยู่ระหว่าง 5.2 – 6.2 การย้อมในกลุ่มนี้ไม่จำเป็นต้องทำการเติมเกลือ เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างมากกว่า 4.7

1.1.3 Fast acid dye หรือ neutral acid dye หรือ super milling dye เป็นกลุ่มสีที่เส้นใยดูดซึมได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง โครงสร้างโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิห้อง ในการย้อมต้องมีการเติมแอมโมเนียมอะซิเตตที่สามารถสลายตัวให้แอมโมเนียออกมาและระเหยไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำย้อมค่อย ๆ ลดลง

1.2 Metal-complex acid dyes เป็นสีแอซิดที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (co-ordinated complex) กับโลหะ เช่น โครเมียม (chromium) และโคบอลต์ (cobalt) โดยที่โลหะ 1 อะตอม จับกับโมเลกุลของสีย้อม 1 หรือ 2 โมเลกุล (ลิลี โกศยานนท์, 2541)

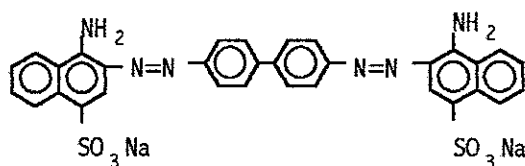
2. สีไดเรกต์ แบ่งเป็น 7 กลุ่มย่อย ได้แก่

2.1 Monoazo เป็นสีไดเรกต์กลุ่มที่มีพันธะอะโซ 1 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุลของสีย้อม ดังภาพที่ 5



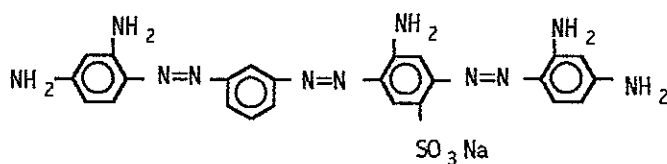
ภาพที่ 5 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเรกต์กลุ่ม monoazo (ไมเดอร์น ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

2.2 Bisazo เป็นสีไดเรกต์กลุ่มที่มีพันธะอะโซ 2 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุลของสีย้อม ดังภาพที่ 6



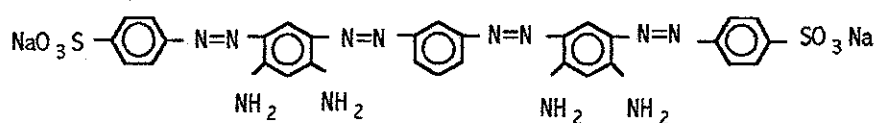
ภาพที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเรกต์กลุ่ม bisazo (ไมเดอรัน ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

2.3 Triazo เป็นสีไดเรกต์กลุ่มที่มีพันธะอะโซ 3 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุลของสีย้อม ดังภาพที่ 7



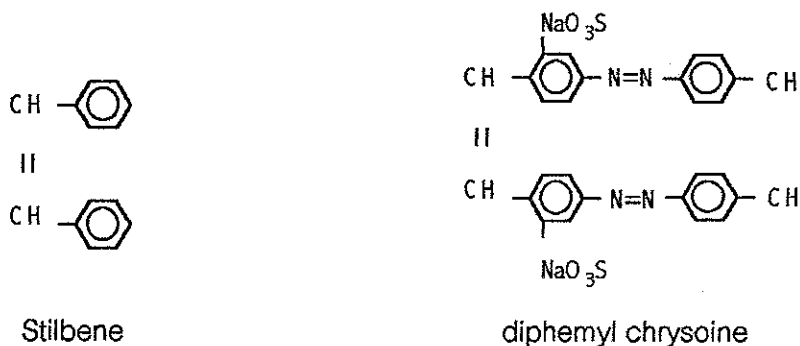
ภาพที่ 7 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเรกต์กลุ่ม triazo (ไมเดอรัน ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

2.4 Polyazo หรือ Tetrakis azo เป็นสีไดเรกต์ที่มีพันธะอะโซมากกว่า 3 ตำแหน่ง ภายในโมเลกุลของสีย้อม ดังภาพที่ 8



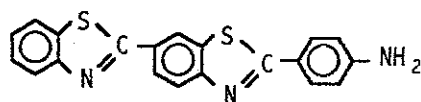
ภาพที่ 8 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเรกต์กลุ่ม polyazo (ไมเดอรัน ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

2.5 Stilbene เป็นสีไดเรกต์กลุ่มที่มีหมู่ของ stilbene อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม ดังภาพที่ 9



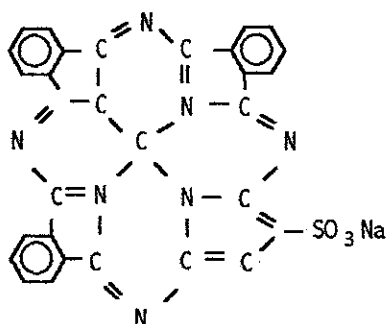
ภาพที่ 9 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเรกต์กลุ่ม stilbene (ไมเคอร์สัน ไคสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

2.6 Thiazole เป็นสีไดเรกต์ที่มีโครงสร้างจัดอยู่ในกลุ่ม heterocyclic amines โดยมีไนโตรเจนอะตอมเกาะอยู่ในตำแหน่งที่ 3 ของวงเบนซีน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเรกต์กลุ่ม triazole (ไมเคอร์สัน ไคสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

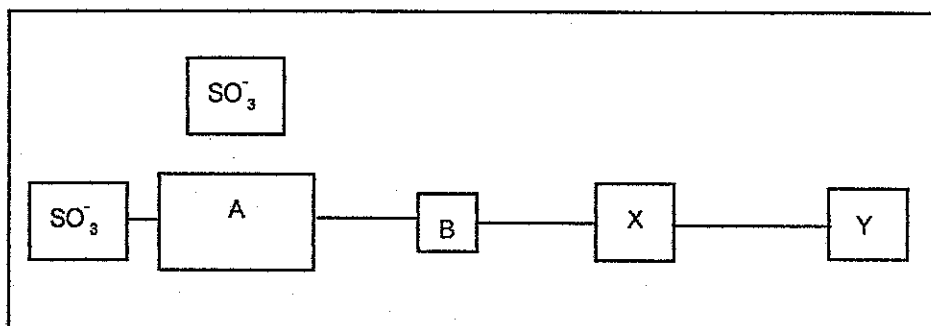
2.7 Phthalocyanine เป็นสีโดเรกท์กลุ่มที่มีโครงสร้างของโมเลกุลประกอบไปด้วยโมเลกุลของ phthalic acid ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของ cyanine ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างโครงสร้างของสีโดเรกท์กลุ่ม phthalocyanine (โมเดอร์น ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

เนื่องจากสีโดเรกท์เป็นสีที่ละลายน้ำได้และแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาพสารละลาย มีแรงยึดกับเส้นใยเซลลูโลส วิธีการย้อมไม่ยุ่งยากต้องการสารช่วยย้อมที่จำเป็นเพียงชนิดเดียวเท่านั้นคือ เกลือ เช่น เกลือแกง (NaCl) หรือเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) การที่สีโดเรกท์ยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลสได้นั้น เชื่อกันว่ามาจากแรงดึงดูดเป็นจำนวนมากของพันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่แรงดึงดูดเหล่านี้ไม่แข็งแรงพอจะประกอบกับคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ของสีโดเรกท์ จึงมีแนวโน้มที่สีจะหลุดออกมาจากภายในเส้นใยทำให้เป็นสีที่ไม่คงทนต่อการซัก แต่ความไม่คงทนต่อการซักนี้สามารถปรับปรุงได้ โดยการใช้สารที่มีประจุบวกให้มารวมตัวกับสีได้ โครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น แต่ความคงทนนี้ไม่ได้คงอยู่อย่างถาวร ดังนั้นในปัจจุบันจึงมักใช้สีโดเรกท์กับการย้อมสีอ่อน ๆ (Morgans, 1990)

3. สีรีแนคทีฟ เป็นสีที่ได้มาจากสารตั้งต้นในกลุ่ม dichlorotriazinyl โดยมีโครงสร้างโดยทั่วไป ดังภาพที่ 12



SO_3^- คือ ตัวอย่างของหมู่ที่ละลายน้ำได้ (solubilizing group)

A คือ chromophore

B คือ binding group

X คือ reactive group

Y คือ leaving group

ภาพที่ 12 โครงสร้างทั่วไปของสีย้อมกลุ่มรีแอคทีฟ (โมเดอรัน ไดสตัฟท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีที่มีประจุลบที่ละลายน้ำได้ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลส ได้พันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสีไดเรกต์กับเส้นใยเซลลูโลสมากจึงมีความคงทนต่อการซักดีกว่า ถึงแม้ว่าหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะมีอยู่หลายชนิดแต่ที่นำมาใช้ ได้แก่ triazines (procion), pyrimidines (levafix, drimarene, cibacron) และ vinylsulfones (remazol) (ลิลี โกศียานนท์, 2541)

สีย้อมรีแอคทีฟนอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสได้แล้วยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียสีบางส่วนไป แต่อย่างไรก็ตามสีส่วนใหญ่ยังคงมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับเส้นใยด้วยเหตุผล 2 ประการ คืออัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยสูงกว่าอัตราเร็วระหว่างสีกับน้ำมาก และมีความเป็นไปได้ที่สีกระจายตัวเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยมากกว่าน้ำ (Trotman, 1970)

กระบวนการผลิตสีย้อมอุตสาหกรรม

การผลิตสีย้อมในเชิงอุตสาหกรรม มีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้ คือ

1. การผสม (premixing) เป็นการนำผงสีและส่วนประกอบที่เป็นของเหลว เช่น สารย้อม ตัวทำละลายหรือตัวกลางบางส่วนผสมเข้าด้วยกัน
2. การบด (grinding) เป็นการทำให้อนุภาคของผงสีมีขนาดเล็กลงตามต้องการ ซึ่งจะเป็นผลให้ผงสีเกิดการเปียกและกระจายตัวได้ดี ในขั้นตอนนี้อาจมีการเติมส่วนประกอบที่เป็นของเหลวที่เหลือลงไปอีกหรือไม่ก็ได้
3. การปรับความข้นเหลว (adjustment of consistency) โดยการเติมสารย้อม สารเติมแต่ง และตัวทำละลายที่เหลือลงไป
4. เทียบสีของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตรงตามสีมาตรฐาน
5. ควบคุมคุณภาพ (quality control) ให้มีสมบัติต่าง ๆ ตรงตามมาตรฐานที่ได้ระบุไว้
6. บรรจุ (filling) ในภาชนะหรือกระป๋องที่มีขนาดต่าง ๆ ตามต้องการ

อันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษของสีย้อมอุตสาหกรรม

ความเป็นพิษที่รุนแรง หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นฉับพลันหรือรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับสารนั้น แม้แต่เพียงระยะเวลาสั้น ๆ ก็ตาม (อังคณา ตูลย์ไตรรัตน์, 2541) เช่น การกลืนสารพิษเข้าไป ได้มีเอกสารบางฉบับ ยืนยันว่าสีย้อมมีความเป็นพิษเมื่อได้รับทางปากค่อนข้างต่ำและสีย้อมมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่า LD_{50} (หนู, ทางปาก) มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสีย้อมน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 15 สีย้อม) มี LD_{50} (หนู, ทางปาก) น้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Mark, 1971) สีย้อมจำนวนมากมักจะระคายเคืองต่อตาและผิวหนัง ถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลที่สามารถใช้เป็นแนวทางที่ถือปฏิบัติระหว่างการผลิตและการใช้งานเพื่อป้องกันอันตรายจากความเป็นพิษของสีย้อมก็ตาม การใช้สีย้อมรวมทั้งอินทรีย์พิกเมนต์ที่ไม่ถูกวิธีมีโอกาที่จะทำให้ได้รับพิษที่รุนแรงได้ ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการกินและการสูดดมสีย้อมนั้นเข้าไป รวมถึงการหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสีทั้งทางตาและผิวหนัง (Razo-Flores, 1997) นอกจากนั้น ความไวของร่างกาย (ทั้งทางผิวหนังและการหายใจ) ต่อความเป็นพิษของสีย้อมก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรให้ความสนใจ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทดังนี้

1. ความไวของผิวหนังต่อความเป็นพิษของสี (skin sensitisation) โรคผิวหนังที่เกิดจากการสัมผัสสีอาจพบในผู้ที่ใช้เสื้อผ้าที่ย้อมด้วยสีย้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเสื้อผ้ากีฬา และเสื้อผ้ารัดรูป เช่น ถุงน่อง สีย้อมที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกสีย้อมที่มีโครงสร้างของสีย้อมเป็นพวกอะโซ และแอนทราควิโนน (anthraquinone) โดยส่วนใหญ่แล้วสีย้อมเหล่านี้จะใช้กับพวกไนลอนมากกว่าโพลีเอสเตอร์ และมักใช้ย้อมเสื้อผ้าบางประเภท ซึ่งการสัมผัสโดยตรงกับผิวหนัง โดยเฉพาะในบริเวณที่มีโอกาสชื้นเหงื่อได้ง่ายจะทำให้เกิดการแพ้ได้ (นันทยา ยานูเมศ, 2539)

2. ความไวของระบบทางเดินหายใจต่อความเป็นพิษของสี (respiratory sensitisation) ได้มีรายงานถึงภูมิแพ้ที่เกิดในระบบทางเดินหายใจเมื่อมีการสัมผัสกับสีย้อมที่ฟุ้ง การสัมผัสหรือสูดดมสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้นั้นอาจทำให้เกิดแอนนาฟิแลคติกช็อก (Anaphylactic shock) ซึ่งอาจเกิดอาการชักตามมาจนถึงขั้นโคม่าและอาจทำให้เสียชีวิตได้ในที่สุด (Trotman, 1970) ถึงแม้ว่าจะมีโอกาสเกิดอันตรายร้ายแรง แต่การใช้สีอย่างถูกต้องสามารถป้องกันการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดภูมิแพ้ในระบบทางเดินหายใจอาจเกิดจากการถ่ายทอดทางกรรมพันธุ์หรือเกิดจากสาเหตุอื่นก็ได้

3. ความสามารถในการก่อมะเร็ง (Carcinogenicity) ศูนย์วิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) ได้ประเมินความสามารถในการก่อมะเร็งของสีย้อม 44 ชนิดและสีย้อมที่มีเบนซีดีนเป็นส่วนประกอบ (benzidine-based dyes) สรุปผลได้ว่าจากสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 44 ชนิด จะมีสีย้อมเพียง 15 ชนิด เท่านั้นที่มีโอกาสที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ และสำหรับสีย้อมที่มีองค์ประกอบของเบนซีดีนอยู่จะพบว่า สีทุกชนิดที่มีองค์ประกอบของสีเป็นเบนซีดีนจะมีโอกาสก่อให้เกิดมะเร็งค่อนข้างมากในมนุษย์ สำหรับสีย้อมประเภทฟักเมนที่จากรายงานการศึกษาที่ผ่านมายังไม่พบว่าฟักเมนที่มีโอกาสก่อให้เกิดมะเร็งกับมนุษย์ได้

สีย้อมอะโซเป็นสีที่รู้กันดีว่าเป็นสีที่สามารถก่อมะเร็งได้ เนื่องจากสีย้อมกลุ่มนี้เมื่อหมู่อะโซแตกตัวแล้วจะให้อะโรมาติกแอมีนออกมา และมีการประมาณกันว่าสีย้อมอะโซทั้งสิ้น 150 ชนิด ที่สามารถแตกตัวให้อะโรมาติกแอมีนที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่มีอะโรมาติกแอมีนที่ก่อมะเร็งเพียง 15 ชนิดเท่านั้นที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมสี (Morgans, 1990) โดยทั่วไปแล้ว สีอะโซจะไม่แตกตัวให้อะโรมาติกแอมีนที่ก่อมะเร็ง แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกอะมิโนซัลโฟนิค (aromatic aminosulphonic acid) ซึ่งไม่ก่อหรือมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก (Trotman, 1970)

โรงงานผลิตสีย้อมที่มีความรับผิดชอบต่อสังคมได้หยุดการผลิตสีย้อมที่มีเบนซีดีนมา

ตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 1970 เนื่องจากไม่มั่นใจในความปลอดภัยของคนงานระหว่างการผลิตสีเหล่านี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเหตุผลทางด้านเศรษฐกิจและเทคนิค โรงงานหลาย ๆ โรงงานในประเทศแถบเอเชียยังคงผลิตสีเหล่านี้อยู่ ทำให้คนงานที่ทำงานในโรงงานผลิตสีหรือทำงานในโรงงานที่ใช้สีย้อมเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งค่อนข้างสูง เนื่องจากสภาพการทำงานที่ไม่ถูกสุขอนามัยรวมถึงอันตรายที่เกิดจากสีเหล่านั้นเองอีกด้วย สำหรับความเป็นพิษของสีย้อมอะโซ มาจากสารพวกอะโรมาติกเอมีน ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสีกลุ่มอะโซในสภาวะไร้อากาศโดยจุลินทรีย์ (Donlon, 1997)

นอกจากจะแตกตัวให้อะโรมาติกเอมีนที่ก่อให้เกิดมะเร็งแล้ว สีย้อมอะโซบางตัวยังแตกตัวให้ออโร-ไดอานิสิดีน (o - dianisidine) หรือ ออโร-โทลิดีน (o - tolidine) ซึ่งก็เป็นสารก่อมะเร็งเช่นกัน ได้มีหลักฐานยืนยันจากการศึกษาว่าสีย้อม 2 กลุ่ม คือ C.I. Acid Red 114 ซึ่งแตกตัวให้ออโร-โทลิดีน และ C.I. Direct Blue 15 ซึ่งแตกตัวให้ออโร-ไดอานิสิดีน เป็นสีที่ก่อให้เกิดมะเร็ง และหลายโรงงานได้ยกเลิกการผลิตสี 2 กลุ่มนี้แล้ว (อังคณา ตูลย์ไตรรัตน์, 2541)

ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของสีย้อมอุตสาหกรรม

สีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมสามารถเห็นได้ง่ายแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปแล้วปริมาณต่ำที่สุดของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำซึ่งจะทำให้สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือ 0.1 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ จากการทดลองของบราวน์ (Brown, 1990) พบว่าสีย้อมที่ปล่อยมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอจะมีความเข้มข้นประมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร

นอกจากนั้นได้มีผู้ทดลองศึกษาปริมาณสีย้อมที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ทินเนอร์ (Tincher, 1970) ได้ศึกษาปริมาณสีดิสเพิลที่ปล่อยลงในแม่น้ำคูซา ซึ่งเป็นแหล่งที่มีการย้อมสีพรมมากที่สุดในสหรัฐอเมริกา นอกจากสีดิสเพิลแล้วยังมีการศึกษาปริมาณสีแอซิดบางตัวในแหล่งน้ำดังกล่าวด้วย การศึกษาผลกระทบของสีย้อม 20 ชนิด ในแม่น้ำยามาลกา ซึ่งเป็นแหล่งอุตสาหกรรมย้อมสิ่งทอของประเทศแคนาดา โดยการวัดความเข้มข้นของสี ปริมาณสารแขวนลอย และตะกอนในแม่น้ำ และวัดสารตกค้างในปลาพบว่ามีย้อมเพียง 3 ชนิด และผลิตผลที่เกิดจากการย่อยสลายของสีย้อม 1 ชนิดเท่านั้นที่ตกค้างในแม่น้ำ (Trotman, 1970) และไม่พบว่ามีสีตกค้างในตัวปลา

สำหรับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีย้อม พอจะสรุปได้ว่าถ้าสีย้อมชนิดนั้น ๆ เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ การกำจัดโดยวิธีการตกตะกอนก็จะสามารถกระทำได้ง่าย และเป็นวิธีที่เหมาะสม แต่ถ้าเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดีการจะกำจัดให้หมดไปก็เป็นเรื่องที่ทำได้ค่อนข้างยาก จึงทำให้แต่ละประเภทมีวิธีการกำจัดที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 (Smith, 1987)

ตารางที่ 1 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งด้วยวิธีการต่าง ๆ

Dye	Coagulation Alum	Activated carbon	Biological	Physicochemical & biological	Ozone	Sludge
Acid	-	+	-	+	+	-
Direct	0	0	-	+	0	+
Reactive	-	+	-	+	+	-

++ : ให้ผลดีมาก + : ให้ผลดี - : ใช้ไม่ได้ 0 : ไม่ได้มีการทดลอง
(ที่มา : นันทยา ยานุนเมศ, 2539)

จากตารางที่ 1 จะพบว่าน้ำทิ้งที่มีสีแอมซิดบำบัดได้ดีด้วยวิธีดูดซับด้วย activated carbon การใช้โอโซน และวิธีทางเคมี กายภาพและวิธีทางชีวภาพเท่านั้น สำหรับสีย้อมที่ สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางเคมี กายภาพ และวิธีทางชีวภาพเท่านั้น ส่วนสีย้อมที่จะสามารถ บำบัดได้ดีมากด้วยวิธีการใช้โอโซน และบำบัดได้ดีโดยใช้ activated carbon และวิธีทางเคมี กายภาพ และวิธีทางชีวภาพ

มีรายงานจากการศึกษาสีย้อม 34 ชนิด จาก 47 ชนิด พบว่า มีค่า $LC_{50} > 100$ มิลลิกรัม/ลิตร (โดยทั่วไป แล้วสีย้อมจะมีค่า LC_{50} อยู่ในช่วง 1 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมี สีย้อมจำนวนมากที่จัดเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมตามเกณฑ์ของสหภาพยุโรป เนื่องจากมีค่า LC_{50} ของสาหร่ายต่ำ (อังคณา ตูลย์ไทรรัตน์, 2541)

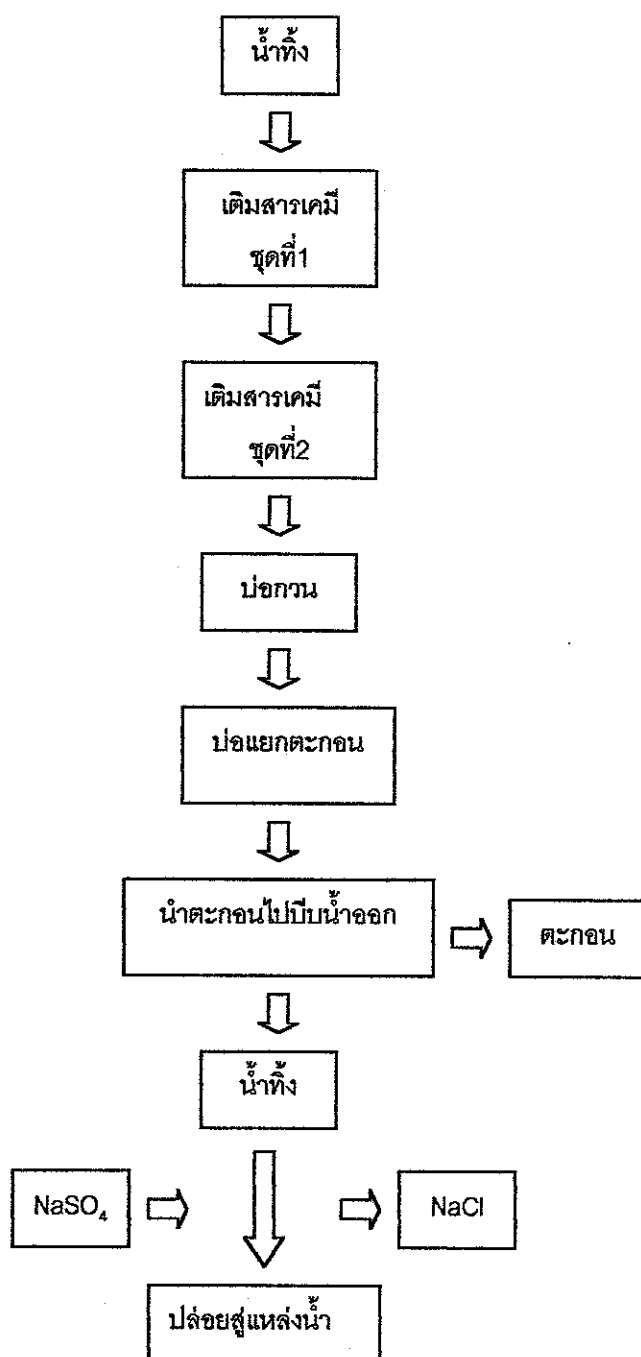
นอกจากนั้นการที่มีสีย้อมเจือปนในแหล่งน้ำทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย เป็นผลมาจากการที่สารละลายสีดูดซับแสงเอาไว้ (ทำให้สาหร่ายได้แสงน้อยลง) มากกว่าเป็นผล มาจากความเป็นพิษของสีนั้น

การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีย้อม

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การดำเนินการเปลี่ยนแปลงสภาพโดยทั่วไปของของเสียในน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่มีความเหมาะสมพอที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อแหล่งรับน้ำเสียนั้น ๆ (พัฒนา มูลพฤกษ์, 2539) เช่น การเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลายและคอลลอยด์เป็นก๊าซและน้ำ โดยส่วนที่เป็นก๊าซจะลอยสู่บรรยากาศทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ โดยปกติแล้วธรรมชาติสามารถปรับสภาพน้ำเสียได้ถ้าปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียไม่มากเกินไป แต่สำหรับในอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมนั้น การบำบัดน้ำเสียโดยส่วนใหญ่ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะนิยมใช้การบำบัดทางเคมี เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีมักจะมีสีย้อมที่ผลิตขึ้นบางส่วนปะปนมากับน้ำเสียและพบว่าลักษณะทางเคมี กายภาพ ของน้ำเสียยังไม่เหมาะสมต่อการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีจึงเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น ๆ สำหรับวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีของโรงงานผลิตสีย้อมโดยส่วนมากจะเป็นการใช้สารเคมีจะใช้เพื่อมุ่งเน้นให้เกิดการตกตะกอนของสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งการใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอนถือได้ว่าเป็นวิธีที่สะดวกที่สุดในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียและช่วยทำให้น้ำเสียมีคุณภาพดีขึ้น

กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมมีขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ มาเก็บไว้ในบ่อพักน้ำเสีย
2. เติมสารเคมีสำหรับช่วยตกตะกอนและปรับพีเอชชุดที่ 1 ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริกซัลเฟต จากนั้นทำการผสมสารเคมีกับน้ำเสียให้เข้ากันและปล่อยให้ทิ้งไว้ระยะหนึ่ง
3. เติมสารเคมีสำหรับตกตะกอนและปรับพีเอชอีกชุดหนึ่ง ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ และตัวตกตะกอนแบบโพลีเมอร์ จากนั้นทำการผสมสารเคมีให้เข้ากันและถ่ายน้ำเสียเข้าสู่บ่อตกตะกอนและบ่อแยกตะกอน
4. แยกตะกอนที่ได้ไปกำจัดต่อ สำหรับน้ำเสียที่ได้จะมีค่าบีโอดี ซีโอดี และปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ผ่านมาตรฐาน แต่ยังมีปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ที่สูง
5. ทำการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ออกจากน้ำเสีย โดยใช้การตกผลึกโซเดียมคลอไรด์ออกโดยเติมโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการตกผลึกของโซเดียมคลอไรด์ สรุปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตสีย้อม

กลไกและวิถีการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซโดยจุลินทรีย์

สีย้อมกลุ่มอะโซเป็นสีกลุ่มที่มีความสามารถในการก่อมะเร็ง ซึ่งจากการศึกษาของ มอร์แกน (Morgans, 1990) พบว่าในการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซ 150 ชนิด มักจะได้สารตัวกลางที่เกิดขึ้นเป็นสารในกลุ่มอะโรมาติกแอมีน เนื่องจากในการย่อยสลายสีกลุ่มอะโซจะเกิดการย่อยสลายตรงตำแหน่งพันธะอะโซ ($N=N$) ทำให้ได้สารกลุ่มอะโรมาติกแอมีน 2 โมเลกุล โดยเมื่อนำมาทดสอบกับสัตว์ทดลองก็พบว่าสามารถทำให้สัตว์ทดลองเป็นมะเร็งได้ นอกจากนี้ในการศึกษาของแนปปี้ (Knapp, 1995) ซึ่งทำการศึกษากการย่อยสลายสีย้อมอุตสาหกรรมที่มีหมู่ chromophore เป็น diazo - linked โดยอาศัยแบคทีเรียผสมจากการย่อยสลายสีย้อมดังกล่าว พบว่า จะเกิดสารตัวกลางที่สำคัญเกิดขึ้น คือ sulphonic acid และในการย่อยสลายสีย้อมอุตสาหกรรมภายใต้สภาวะไร้อากาศก็พบว่าสามารถย่อยสลายสีย้อมอุตสาหกรรมได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 2 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของคุดลิช (Kudlich, 1997) ที่พบว่าสารตัวกลางจากการย่อยสลายสีย้อมอะโซเป็น sulfonate anthraquinones โดยจากการศึกษาผลของการรีดักชันในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic reduction) ในการย่อยสลายสีกลุ่มอะโซ โดยแบคทีเรีย *Sphingomonas* sp. strain BN6 หรือใช้จุลินทรีย์ผสมจากตะกอนเร่ง (activated sludge) ซึ่งผลจากการรีดักชันของสีกลุ่มอะโซจะเกิดสารกลุ่ม sulfonate anthraquinones ขึ้น การรีดักชันสีกลุ่มอะโซของจุลินทรีย์เหล่านี้เกิดจากการทำงานของเอนไซม์อะโซรีดักเตส (azo reductase) และสามารถตรวจพบเอนไซม์ชนิดนี้ได้ทั้งบริเวณไซโตพลาสซึม (cytoplasmic) และ membrane bound ของเซลล์ของ *Sphingomonas* sp. strain BN6

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโดยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสีย้อม ส่วนใหญ่ทำการศึกษาโดยใช้สีย้อมบริสุทธิ์ โดยจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสีย้อมได้ มีทั้งแบคทีเรีย รา และ *Streptomyces* ดังนี้

คอลลีน (Colleen, 1990) ได้รายงานผลการศึกษากการย่อยสลายสี Orange II Tropaeolin O Congo Red และ Azure B ของเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* ในอาหารเหลวที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูง โดยติดตามผลการย่อยสลายสีโดยการวัดค่า

การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะของสีแต่ละชนิด พบว่าเชื้อราไม่สามารถย่อยสลายสีย้อมดังกล่าวได้ แต่เมื่อสกัดเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ดังกล่าวผลิตขึ้นไปทำการทดสอบการย่อยสลายสารกลุ่มลิกนิน กลับพบว่าเอนไซม์ดังกล่าวมีผลในการย่อยสลายสารกลุ่มลิกนิน และเมื่อทำให้เอนไซม์บริสุทธิ์ พบว่าลิกนินเปอร็อกซิเดสเป็นเอนไซม์เพียงตัวเดียวที่ไม่สามารถย่อยสลายสารกลุ่มลิกนินได้ แต่เมื่อทำการทดสอบการย่อยสลายสีอีกชุดโดยทำการเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลวที่มีความเข้มข้นไนโตรเจนต่ำกลับพบว่าการย่อยสลายสีเกิดขึ้น และสามารถตรวจพบการทำงานของลิกนินเปอร็อกซิเดสในการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนมีผลต่อการทำงานของลิกนินเปอร็อกซิเดส กล่าวคือ ที่ความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงการทำงานของเอนไซม์ลิกนินเปอร็อกซิเดสจะไม่สามารถทำงานได้ดี แต่ในทางกลับกันถ้ามีความเข้มข้นของไนโตรเจนปริมาณต่ำลิกนินเปอร็อกซิเดสจะสามารถทำงานได้ดี

แพสตีกริกส์บาย (Pasti-Grigsby, 1992) ได้ทำการศึกษากการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซ 20 ชนิด โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ 2 สายพันธุ์ในการศึกษา ได้แก่ *Streptomyces* sp. และ *Phanerochaete chrysosporium* โดยการทดลองการย่อยสลายสีกลุ่ม monoazo โดย *Streptomyces* sp. ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้จะเป็นกลุ่มอะโซเบนซีน (azobenzene) ซึ่งผลจากการย่อยสลายจะได้ hydroxy group อยู่ในตำแหน่ง para ของ azo - linkage และได้ methoxy หรือ alkyl group อยู่ในตำแหน่ง ortho ของ azo - linkage นอกจากนี้ยังทดลองย่อยสลายสีกลุ่ม monoazo โดย *Phanerochaete chrysosporium* โดยใช้ substrate เป็นกลุ่มของ naphthol ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยสลายสีจะได้ hydroxy group อยู่ในตำแหน่ง para ของ azo - linkage และได้ methoxy หรือ alkyl group อยู่ในตำแหน่ง ortho ของ azo - linkage เช่นเดียวกับการย่อยสลายสีย้อมของ *Streptomyces* sp. และพบว่าเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซโดยจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิด จะเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเปอร็อกซิเดส

สปาดารอ (Spadaro, 1992) ทำการศึกษากการย่อยสลายสีกลุ่มอะโซ ภายใต้สภาวะที่มีปริมาณไนโตรเจนจำกัด โดยใช้เชื้อราในกลุ่ม white rot fungi คือ *Phanerochaete chrysosporium* ในการศึกษาได้ทำการติดฉลาก ^{14}C ไว้ในสีอะโซ ซึ่งสีที่เลือกให้ทดสอบ ได้แก่ 4-phenylazophenol, 4-phenyl-azo-2-methoxyphenol, Yellow 3 [2-(4-nitrophenylazo)-aniline], Yellow 14 (1-phenylazo-2-naphthol) หลังจากทำการทดลองเลี้ยงไว้ 12 วัน พบว่า จะมีการย่อยสลายของสีประมาณ 23.1 - 48.1 เปอร์เซ็นต์ โดยวงแหวนของอะโรมาติกที่

ตรวจสอบได้หลังจากการย่อยสลายจะสามารถตรวจพบ ไฮดรอกซิล, อะมิโน, อะซีตามิโดหรือ ไนโตร เป็นองค์ประกอบในวงแหวนของอะโรมาติกด้วย โดยใช้การวิเคราะห์จาก ^{14}C ที่ติดฉลาก ไว้ในสีย้อมตั้งแต่ต้น

โกวินดาสวามี (Govindaswami, 1993) ศึกษาวิธีการตรวจหาแบคทีเรียในกลุ่ม แอโรบิกที่สามารถย่อยสลายสีกลุ่มอะโซ ได้โดยการใช้การหา 16S rRNA gene และวิเคราะห์หาลำดับของกรดไขมัน (fatty acids) พบว่าสามารถจำแนกแบคทีเรียดังกล่าวได้เป็น *Caulobacter subvibrioides* หลังจากนั้นก็นำเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวไปเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (bioreactor) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีอะโซต่อไป ซึ่งพบว่าแบคทีเรียที่สามารถคัดแยกได้ โดยวิธีดังกล่าวสามารถย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซได้

กอตเตอร์แมน (Kotterman, 1994) ได้ทำการศึกษาเชื้อราในกลุ่ม white rot คือ *Bjerkandera* sp. strain BOS 55 พบว่าเชื้อราดังกล่าวสามารถผลิตเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้สูงและยังสามารถย่อยสลายสารกลุ่ม polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ได้อีกด้วย โดยในการทดลองได้ทำการเลือกใช้ anthracene เป็นตัวแทนในการศึกษาโดยทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ คือ ออกซิเจน แหล่งไนโตรเจนและแหล่งคาร์บอน นอกจากนี้ก็ยังเลือกทดสอบกับสีกลุ่ม polymeric dyes โดยใช้สี Poly R-478 เป็นตัวแทน จากการศึกษาพบว่าออกซิเจนมีความสำคัญมากในการย่อยสลาย anthracene ซึ่งในการย่อยสลาย anthracene จะพบว่ามีสารประกอบของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสเป็นจำนวนมาก และผลผลิตจากการย่อยสลายจะเกิดสารกลุ่ม anthraquinone ขึ้น แต่ในกรณีของการย่อยสลายสี Poly R-478 กลับพบว่ามี การย่อยสลายได้เพียงเล็กน้อย สำหรับผลของความเข้มข้นของไนโตรเจน พบว่าถ้ามีความเข้มข้นของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) สูงกว่า 22 มิลลิโมล จะไม่มีการยับยั้งการย่อยสลาย anthracene ส่วนการย่อยสลายสี Poly R-478 จะสามารถย่อยสลายได้ตั้งแต่ 0 – 40 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนี้ในการย่อยสลาย anthracene ยังต้องการกลูโคสอย่างน้อย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

แนปป์ (Knapp, 1995) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซที่มีหมู่โครโมฟอร์เป็น diazo-linked โดยใช้แบคทีเรียผสมในสภาวะไร้อากาศ พบว่าสามารถทำให้เกิดการลดลงของสีได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 2 วัน

วอง (Wong, 1996) ทำการศึกษากการย่อยสลายสี methyl red โดยใช้แบคทีเรีย *Klebsiella pneumoniae* RS13 ที่สามารถคัดแยกได้จากสลัดจ์ที่มีการปนเปื้อนของสีกลุ่มอะโซ

162300

๑
363.731
5886 ๗
๑

และ methyl red ซึ่งในการศึกษาการย่อยสลายสี methyl red จะทำการศึกษาการย่อยสลายภายใต้สภาวะแอโรบิกหรือให้อากาศ โดยศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นกลูโคส ความเข้มข้นเอทานอล ความเข้มข้นแอมโมเนียซัลเฟต และความเป็นกรดต่าง ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า *Klebsiella pneumoniae* RS13 สามารถย่อยสลายสี methyl red ได้ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จนถึงความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้

ซิสสิ (Zissi, 1996) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซที่ผลิตจากโรงงานผลิตสีย้อม ได้แก่ disperse azo dyes และ p-aminoazobenzene โดยทำการศึกษาการย่อยสลายภายใต้สภาวะแอนอ็อกซิด (anoxic) โดยใช้ *Bacillus subtilis* เนื่องจากแบคทีเรียดังกล่าวมีความสามารถในการใช้ไนโตรเจนและไนไตรท์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย พบว่าในการย่อยสลายสีย้อมดังกล่าวจะเกิดการย่อยสลายตรงบริเวณ nitrogen double bond เป็นผลให้เกิดสารออกมา 2 ชนิด ได้แก่ อะนิลีน (aniline) และ พารา - ฟีนิลีนไดแอมีน (p-phenylenediamine)

ดอนลอน (Donlon, 1997) ทำการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซในสภาวะ methanogenic ซึ่งในการย่อยสลายในสภาวะดังกล่าวสีย้อมกลุ่มอะโซจะถูกรีดิวส์ทำให้เกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์เป็นผลให้ไม่เกิดสารกลุ่มอะโรมาติกแอมีนขึ้น ในการศึกษาจะใช้สีย้อม Mordant Orange 1 เป็นตัวแทนในการศึกษาโดยทำการศึกษากายในถังปฏิกรณ์ 2 ชุด ชุดที่ 1 จะทำการเลี้ยงภายในสภาวะ methanogenic ส่วนชุดที่ 2 จะทำการเติม co-substrate คือ กลูโคสหรือ volatile fatty acids พบว่าในการย่อยสลายสี Mordant Orange 1 ในถังปฏิกรณ์ชุดที่ 1 สามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ภายในเวลา 50 วัน ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ชุดที่ 2 ใช้เวลาในการย่อยสลาย 217 วัน และได้สารออกมา 2 ชนิด คือ 1,4-phenylenediamine และ 5-aminosalicylic acid

ราโซฟลอเรส (Razo-Flores, 1997) ศึกษาการย่อยสลายสีกลุ่มอะโซภายใต้สภาวะ methanogenic โดยใช้ตัวอย่างสีกลุ่มอะโซเป็น Mordant Orange 1 และ azodisalicylic พบว่าสี Mordant Orange 1 เมื่อถูกย่อยสลายแล้วจะได้ผลผลิตออกมาเป็นสาร 5-aminosalicylic acid และ 1,4-phenylenediamine ส่วน azodisalicylic เมื่อถูกย่อยสลายจะได้สาร 5-aminosalicylic acid 2 โมเลกุล

ยัง (Young, 1997) ทำการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นใช้ใน

อุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาการย่อยสลายสีสังเคราะห์ 8 ชนิด ซึ่งสีดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่ม azo, anthraquinone, metal complex และ indigo โดยอาศัยเชื้อราในกลุ่ม white rot และราในกลุ่มที่ผลิตเอนไซม์ peroxidase-catalyzed oxidation เป็นกลุ่มที่ใช้ในการทดลอง จากการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์พบว่า เอนไซม์ manganese-dependent peroxidase ไม่มีผลในการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ดังกล่าว แต่ในทางกลับกัน เอนไซม์ ligninase-catalysed oxidation มีผลในการย่อยสลายมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และจากการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์โดยอาศัยราในกลุ่ม white rot จำเป็นจะต้องมีการผลิตสารต่าง ๆ ขึ้น เพื่อให้ในการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ ได้แก่ ligninase, hydrogen peroxide และ veratryl alcohol

ตาตารโก (Tatarko, 1998) ทำการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซ ชนิด congo red โดยให้รากลุ่ม basidiomycete คือ *Phanerochaete chrysosporium* ในอาหารชนิดเหลวและชนิดแข็งที่ผสมสี congo red ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเอนไซม์ที่สำคัญที่มีส่วนสำคัญในการย่อยสลายสี congo red คือ lignin peroxidase

ซารีนิก (Samaik, 1999) ศึกษาความสามารถของ *Pseudomonas mendocina* MCM B-402 ในการใช้ triphenylmethane และ methyl violet เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับใช้ในการเจริญเติบโต พบว่า *P. mendocina* สามารถลดสีของ methyl violet ได้ภายใน 24 ชั่วโมง โดยได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และพบสารตัวกลางอีก 4 ชนิด ซึ่งเป็นสารที่ไม่ทราบชนิด 3 ชนิดและฟีนอล

อบาดุลลา (Abadulla, 2000) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมกลุ่ม triarylmethane, indigoid, azo และ anthraquinonic โดยใช้เชื้อรา *Trametes hirsuta* และเอนไซม์แลคเคส โดยอัตราในการลดลงของสี (decolourization) จะขึ้นอยู่กับลักษณะของวงแหวนฟีนอล ซึ่งเอนไซม์แลคเคสของ *Trametes hirsuta* สามารถถูกยับยั้งการทำงานได้ด้วย halides, copper chelate และสีกลุ่มต่าง ๆ โดยพบว่าเอนไซม์ laccase จะเสียสภาพในการทำงานถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับเอนไซม์แลคเคสที่แยกจากจุลินทรีย์ชนิดอื่น พบว่าสามารถลดสีของสีย้อมกลุ่มดังกล่าวได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

โอนีลล์ (O'Neill, 2000) ทำการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซ ในสภาวะไร้อากาศและให้อากาศ โดยใช้ตัวอย่างสีเป็น Procion Red H-E7B ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในสภาวะไร้อากาศ การย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซจะเกิดการย่อยที่พื้นระอะโซโดยใช้ปฏิกิริยาแบบรีดักชัน ผลที่เกิดจากการย่อยในสภาวะไร้อากาศจะเกิดสารพวกอะโรมาติกแอมีน ซึ่งจัดเป็น

สารก่อการกลายพันธุ์ที่สำคัญกลุ่มหนึ่ง ในสภาวะการย่อยแบบไร้อากาศจะเป็นสภาวะที่เมื่อเกิดการย่อยแล้วสามารถสังเกตได้จากลักษณะของสีที่จางลงหรือหายไป หลังจากนั้นก็ทำการย่อยสลายต่อในสภาวะให้อากาศ สำหรับสารอะโรมาติกแอมีนที่เกิดขึ้นจะถูกย่อยสลายต่อไปในสภาวะให้อากาศ โดยการตรวจวิเคราะห์จะใช้เครื่อง high-performance liquid chromatography / ultra violet (HPLC-UV) เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจวัดการย่อยสลายของสี Procion Red H-E7B

ราชากูรู (Rajaguru, 2000) ศึกษากระบวนการย่อยสลายสีย้อมกลุ่ม sulfonate azo ภายใต้สภาวะไร้อากาศ - ให้อากาศ โดยใช้แบคทีเรียผสมที่คัดแยกได้จากดินที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้า ตัวอย่างสีย้อมที่ใช้ได้แก่ Orange G, Amido black 10B, Direct red 4BS และ Congo red ซึ่งในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ จะทำการเลี้ยงแบคทีเรียไว้ใน fix-bed column โดยใช้กลูโคสเป็น co-substrate ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายจะเป็นสารกลุ่มแอมีน ซึ่งหลังจากนั้นสารกลุ่มแอมีนจะถูกย่อยสลายต่อภายใต้สภาวะให้อากาศ สำหรับอัตราการย่อยสลายสูงสุดในกระบวนการย่อยสลายพบว่า Orange G สามารถย่อยสลายได้สูงสุด 60.9 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน Amido black 10B สามารถย่อยสลายได้สูงสุด 571.3 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน Direct red 48S สามารถย่อยสลายได้สูงสุด 112.5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และ Congo red สามารถย่อยสลายได้สูงสุด 134.9 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน