

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตอนที่ 1 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

1. สีย้อม (dye)
2. สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuff)
3. การจำแนกประเภทของสีย้อมสังเคราะห์
4. สีมาลาไคน์กรีน (Malachite green)
5. ความเป็นพิษของสีย้อม
6. อันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษของสีย้อม
7. มลพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม
8. การบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อม
9. วิธีตะกอนเร่ง (activated sludge)
10. กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

ตอนที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตอนที่ 1 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

1. สีย้อม (dye)

1.1 ความหมายของสีย้อม จากการศึกษาสีย้อม ได้มีผู้ให้ความหมายของสีย้อมไว้หลายความหมาย เช่น

อังคณา ตูลย์ไครรัตน์ (2540) ได้ให้ความหมายของสีย้อมไว้ว่า หมายถึง สารที่อาจละลายหรือไม่ก็แขวนลอย จะใช้ในกระบวนการย้อมโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว โดยจะเกิดพันธะไอออนิกหรือพันธะโคเวเลนต์กับวัตถุนั้น

มณฑา จันทร์เกตุเลิศ (2541) ได้ให้ความหมายของสีย้อมไว้ว่า หมายถึง สารให้สีที่ละลายน้ำได้หรือบางชนิดที่ละลายไม่ได้ในขณะที่ยังไม่นำไปย้อม แต่เมื่อนำไปย้อมโมเลกุลของสีย้อมจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยด้วยวิธีการใด ๆ ก็ตามและยึดติดกับโมเลกุลเส้นใยในลักษณะต่าง ๆ

และจากวารสารคัดเลอร์เวย์ (2544) ได้ให้ความหมายของสีย้อมไว้ว่า หมายถึง สารมีสีที่ละลายน้ำได้ หรืออาจทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ เวลาใช้มักจะถูกดูดซึมเข้าไปในวัสดุที่ถูกย้อมจากสารละลายในน้ำ

1.2 ประเภทของสีย้อม สีย้อมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

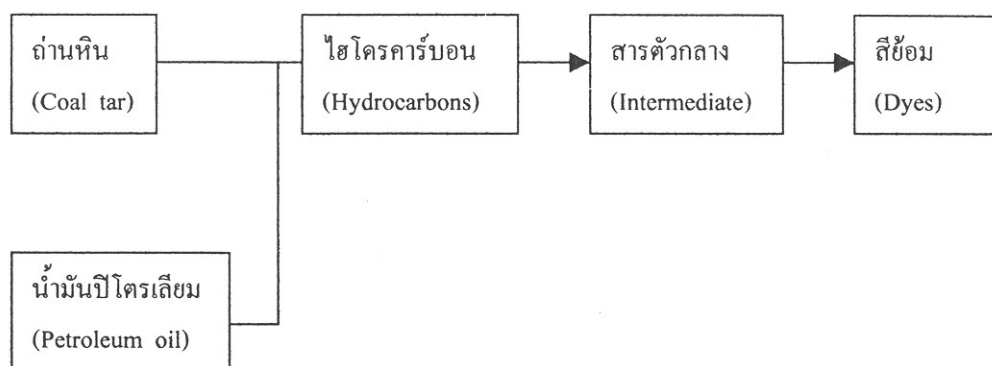
1.2.1 สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuff) ได้แก่ สีที่สกัดได้ตามธรรมชาติ เช่น จากต้นพืช เมล็ดพืช เปลือกหอยและอื่น ๆ

1.2.2 สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuff) ได้แก่ สีที่ผลิตขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับสารเคมี

ในปัจจุบันสีย้อมสังเคราะห์ได้เข้ามาแทนที่สีย้อมธรรมชาติเกือบทั้งหมดแล้ว เนื่องจากสีย้อมสังเคราะห์มีการผลิตและมีคุณภาพที่แน่นอนกว่าสีย้อมธรรมชาติ อีกทั้งยังหาได้ง่ายกว่าและโดยทั่วไปมีราคาถูกกว่าสีย้อมธรรมชาติประเภทเดียวกัน (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16) จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม หัตถกรรมและอื่น ๆ

2. สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuff)

2.1 การผลิตสีย้อมสังเคราะห์ วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตสีย้อมสังเคราะห์ คือ ถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งทั้งถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียมจะมีกระบวนการผลิตพื้นฐานดังแสดงในภาพที่ 1 (Frez-david, 1949)



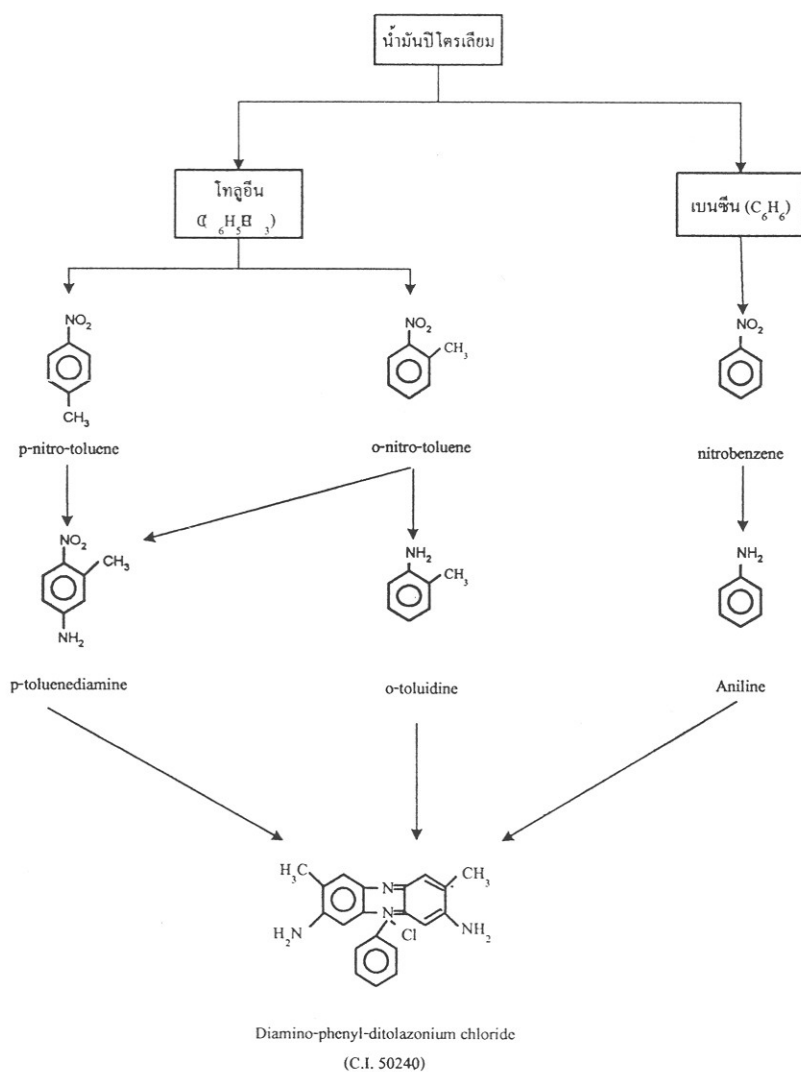
ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการพื้นฐานในการผลิตสีย้อม

ถ่านหินหรือน้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสีย้อม เมื่อผ่านกระบวนการสกัดแล้วจะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวได้แก่ เบนซีน, ไซลีน, แอนทราซีน, โทลูอิน และเนฟทาลีน เป็นต้น สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาต่อไปที่สำคัญเช่น ปฏิกิริยาไนเตรชันและปฏิกิริยาเอมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (intermediate) และจากสารตัวกลางที่ได้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ

2.2 ตัวอย่างการผลิตสีย้อมสังเคราะห์ การผลิตสีย้อมเบสิก (Basic Red 2), C.I.

50240 หรือเรียกชื่อตามระบบ IUPAC คือ Diamino-phenyl ditolazonium chloride

วัตถุดิบ คือ น้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบจากถ่านหินเมื่อผ่านการสกัดแล้วจะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน 2 ตัว คือ โทลูอินและเบนซีนและสารทั้งสองชนิดจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาไนเตรชันจะได้สารประกอบตัวกลางคือ *p*-nitrotoluene, *o*-nitro-benzene และ nitrobenzene จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาเอมิเนชันได้สารตัวกลางชนิดใหม่เกิดขึ้น คือ *p*-toluenediamine, *o*-toluidiene และอะนิลีน สารตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้ จะถูกนำไปสังเคราะห์สีย้อม Diamino-phenyl ditolazonium chloride ดังแสดงในภาพที่ 2 (Frerz-david, 1949)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการผลิตสีย้อมเบสิก

2.3 คุณสมบัติของสีย้อมสังเคราะห์ สีย้อมสังเคราะห์ที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- 2.3.1 มีความเข้มของสี (intense colour) เมื่อใช้ในปริมาณน้อยก็ให้สีที่เข้มได้
- 2.3.2 มีการละลายตัวในลักษณะสารละลายน้ำ (aqueous solution) ในเกือบทุกกรณี ซึ่งอาจจะอยู่อย่างถาวรหรือเฉพาะระหว่างที่มีการย้อม
- 2.3.3 มีความสามารถในการดูดซึมและติดอยู่ในเส้นใย (substantivity) หรือรวมกับเส้นใยโดยปฏิกิริยาทางเคมี (reactivity)
- 2.3.4 มีความคงทน (fastness) คือ สามารถทนต่อการกระทำต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตและการใช้ตามปกติ (มณฑา จันทร์เกตุเลิศ, 2541)

2.4 การเกิดสีของสีย้อม จากการรายงานของธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527) ได้กล่าวถึงการเกิดสีของสีย้อมไว้ว่า โดยทั่วไปสีย้อมจะมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมหลายกลุ่มคือ ใน 1 โมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมที่เรียกว่า “ออกโซโครม” (auxochromes) ได้แก่ $-OH$, $-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$, $-SO_3$ และ $-COOH$ ซึ่งกลุ่มอะตอมนี้จะมีคุณสมบัติทำให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยาคัดกับเส้นใยได้ ถ้าโมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลสีย้อมนั้นจะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใยแต่แสดงสมบัติของสีออกมา ซึ่งเรียกโมเลกุลดังกล่าวว่า “โครมาเจน” (chromagen) และใน 1 โมเลกุลสีย้อมยังประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมที่เรียกว่า “โครโมฟอร์” (chromophores) ซึ่งกลุ่มอะตอมนี้จะมีคุณสมบัติทำให้เกิดสีที่ตามนุษย์ปกติสามารถมองเห็นได้ มีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

2.4.1 กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) : $-NO$ (หรือ $=N-OH$)

2.4.2 กลุ่มไนโตร (nitro group) : $-NO_2$ (หรือ $=NO.OH$)

2.4.3 กลุ่มเอโซ (azo group) : $-N=N-$

2.4.4 กลุ่มเอทิลีน (ethylene group) : $C=C$

2.4.5 กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) : $C=NH$

2.4.6 กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group) : $C=O$

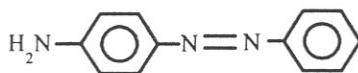
และ $CH=N$

2.4.7 กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group) : $C=S$ และ $C-S-S-C$

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

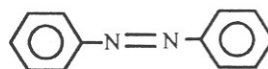
ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน (aminoazobenzene dyestuff)

มีสูตรโมเลกุลคือ



กลุ่มอะตอมออกโซโครม คือ $-NH_2$

โมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจน คือ



และกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ คือ $-N=N-$ ทั้งกลุ่มออกโซโครม โครมาเจนและโครโมฟอร์จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาแบ่งกลุ่มสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี

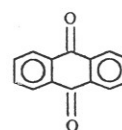
3. การจำแนกประเภทของสีย้อมสังเคราะห์ การจำแนกประเภทของสีย้อมอาจกระทำได้ 2 วิธี ดังนี้

3.1 การจำแนกประเภทตามโครงสร้างเคมี การจำแนกประเภทโดยวิธีนี้ อาจจำแนกโดยละเอียดได้ 20 ประเภท แต่สีย้อมที่สำคัญ 5 ประเภทแรกมีดังนี้ (เรียงลำดับตามปริมาณสีที่ใช้จากมากไปหาน้อย)

3.1.1 สีย้อมอะโซ (Azodyes) มีกลุ่ม $-N=N-$ เป็นโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

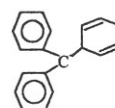
3.1.2 สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) มีกลุ่ม

เป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดในโมเลกุล



3.1.3 สีย้อมไตรฟีนีลมีเทน (Triphenylmethane dyes) มีกลุ่ม

เป็นโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

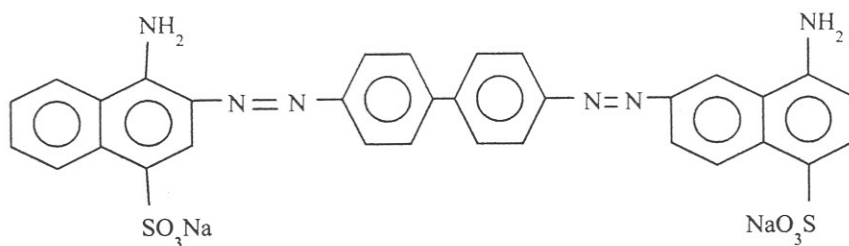


3.1.4 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) มีกลุ่ม $D-S-S-D$ เป็นโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

3.1.5 สีย้อมอินดิโกอยด์ (Indigoids) มีกลุ่ม $-C-C=C-C-$ เป็นโครงสร้างที่สำคัญอยู่ในโมเลกุล (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2 การจำแนกประเภทสีย้อมตามกรรมวิธีการย้อม การจำแนกโดยวิธีนี้สามารถแบ่งได้เป็น 11 ประเภท ดังนี้คือ

3.2.1 สีย้อมไดเรกต์ (direct dyes) สีย้อมประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพวอะโซ ซึ่งเป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิก (sulphonic acid) ทำให้ตัวสีย้อมละลายน้ำได้ง่าย มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โมเลกุลของสีย้อมแตกตัว (ionized) โดยตัวเองมีประจุลบ (anion) สีย้อมติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลสีย้อมจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงได้ดังภาพที่ 3



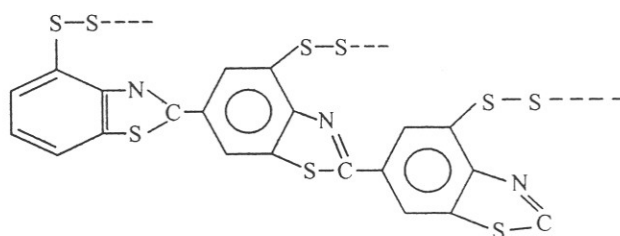
ภาพที่ 3 โครงสร้างของสีแดงเร้ด 14 (Direct Red 14) (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2.3 สีย้อมเบสิก (basic dyes) เป็นไฮโดรคลอไรด์หรือเกลือของเบสอินทรีย์ (organicbase) ซึ่งละลายในน้ำ จะแตกตัวและตัวเองมีประจุบวก (cationic) สีจะติดเส้นใยโดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสีย้อมกับประจุบนเส้นใย ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างสีย้อมเบสิก บราว 1 (Basic Brown 1) (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

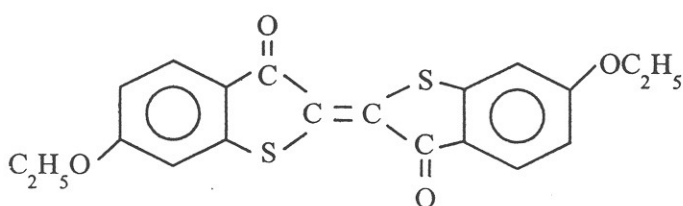
3.2.3 สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dyes) สีย้อมประเภทนี้เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (complex organic compounds) ที่ซัลเฟอร์อะตอมปนอยู่ด้วยในโมเลกุล โดยปกติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ ทำให้โมเลกุลของสีแตกออกเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ที่ละลายในน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง เมื่อย้อมเสร็จแล้วจึงทำปฏิกิริยาให้กลับไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างของสีย้อมซัลเฟอร์ (Frerz-david, 1949)

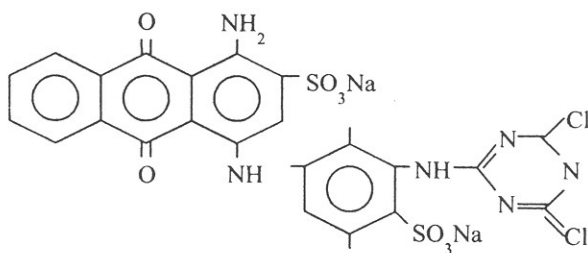
3.2.4 สีอะโซอิก (azoic dyes) สีอะโซอิกหรือสีแนพทอล เป็นสีกลุ่มอะโซ ตัวสีไม่ละลายน้ำ สีชนิดนี้ต้องย้อมโดยปฏิกิริยาทางเคมี (coupling component) ระหว่างสารเคมี 2 ชนิด คือ แนพทอล (naphthol) และพวกไคอะโซ

3.2.5 สีแว็ต (vat dyes) สีประเภทนี้เป็นสีที่มีกลุ่มคีโต (keto group $C=O$) ตัวสีจะไม่ละลายน้ำ แต่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบ leuco ที่ละลายน้ำได้เมื่อทำปฏิกิริยากับโซดาไฟและสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไฮโครซัลไฟด์เป็นเกลือสีที่ละลายน้ำได้ เมื่อสีถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใยแล้วก็สามารถทำให้กลับคืนเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำได้โดยการออกซิเดชันกับอากาศหรือสารออกซิไดส์ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงได้ดังภาพที่ 6



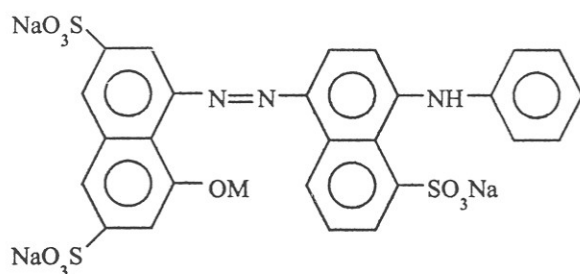
ภาพที่ 6 โครงสร้างของสีแว็ต ออเรนจ์ 5 (Vat Orange 5) (สีข้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2.6 สีรีแอคทีฟ (reactive dyes) สีประเภทนี้สามารถละลายน้ำได้ง่าย ทำให้ตัวสีเป็นประจุลบ โมเลกุลของสีประกอบด้วยกลุ่มเคมีที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive group) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีโดยการเกิด covalent chemical bonds กับ OH groups ของเส้นใย ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 7



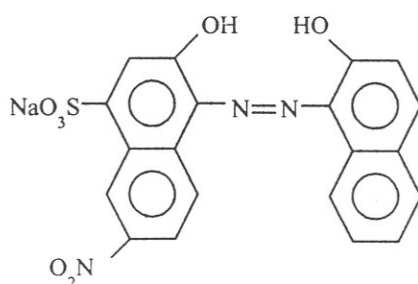
ภาพที่ 7 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ บลู 4 (Reactive Blue 4) (สีข้อม, 2544, 14 – 16)

3.2.7 สีแอซิด (acid dyes) สีประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิก ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับสีไคเร็กซ์ แต่มีขนาดของโมเลกุลเล็กกว่าโมเลกุลสี สามารถละลายน้ำได้และมีประจุเป็นลบ สีกุุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด ซึ่งสามารถย้อมติดได้ดีด้วยพันธะขั้วเหนียวแบบ ionic linkage ตัวอย่างสี และสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 8



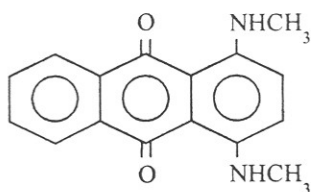
ภาพที่ 8 โครงสร้างของสีแอซิด บลู 92 (Acid Blue 92) (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2.8 สีมอร์แดนต์ (mordant dyes) สีประเภทนี้เป็นสีย้อมที่ต้องใช้สารช่วยติด (Mordant) เข้าไปช่วยให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะโครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม โดยการย้อมในขั้นตอนแรกคล้ายการย้อมด้วยสีแอซิด แต่เมื่อเสร็จแล้วจะต้องนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือโลหะ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 9



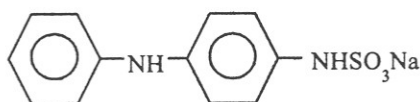
ภาพที่ 9 โครงสร้างสีมอร์แดนต์ แบลค 1 (Mordant Black 1) (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2.9 สีดิสเพส (disperse dyes) สีประเภทนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้บ้างเพียงเล็กน้อยในน้ำที่อุณหภูมิสูง สภาพที่อยู่ในน้ำเป็นลักษณะกระจายตัวแขวนลอย (dispers suspension) การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย หรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โครงสร้างของสีคิสเพิส บลู 14 (Disperse Blue 14) (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2.10 สีออกซิเคชั่น (oxidation dyes) สีประเภทนี้เป็นสีย้อมที่สามารถถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ หลังจากที่ได้ย้อมให้เข้าไปเกาะติดในเส้นใยแล้ว สีพวกนี้เมื่อถูกออกซิไดซ์ในเส้นใยจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 โครงสร้างของสีออกซิเคชั่น เบส 3 (Oxidation Base 3) (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

3.2.11 สีอินเกรน (ingrain dyes) เป็นสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวกลาง (intermediates) ในเส้นใย นอกเหนือจากพวกที่เป็นสีอะโซอิก ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ สีรอลโล ไชยานินซึ่งใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ (คะนิง จันทรศิริ, 2531; สีย้อม, 2544, หน้า 14-16; มณฑา จันทรเกตุเลียด, 2541; Frerz-david, 1949)

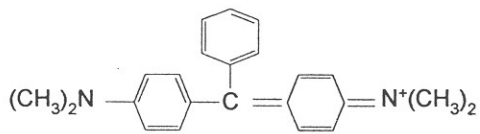
การจำแนกประเภทของสีย้อมสามารถสรุปลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่าง ๆ ได้ดังตาราง 1

ตารางที่ 1 สรุปลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่าง ๆ (สีย้อม, 2544, หน้า 14-16)

ประเภทของสีย้อม	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
1. สีไคเร็กซ์	Azo, (stilbene, thiazole, oxazine)
2. สีเบสิก	Azo, nthaquinone, triphenylmethane, methine, thiazine, oxazine, acridine, quinoline
3. สีซัลเฟอร์	sulphur-containing compound
4. สีอะโซอิก	Azo
5. สีแคว้ต	Anthraquinone, indigoid
6. สีรีแอคทีฟ	Azo, anthraquinone
7. สีแอตีด	Azo, anthraquinone, triphenylmethane, (azine, xanthane, nitro, nitroso, quinoline)
8. สีเมอร์แคปต์	Azo, anthraquinone, nitroso
9. สีคิสเพิส	Azo, anthraquinone, nitro
10. สีออกซิเดชั่น	
11. สีอินเกรน	phthalocyanine

4. สีมาลาไคน์กรีน (Malachite green)

จัดอยู่ในประเภท	สีเบสติก
สังเคราะห์จาก	Triphenylmethane (อัญจราพร ไสละสูตร, 2530)
ชื่อทางเคมี	N,N,N',N'-Tetramethyl-4,4'- diaminotriphenylcarbenium oxalate
Color Index	42000
สูตรโมเลกุล	$C_{25}H_{26}N_2O_4$
สูตรโครงสร้าง	



น้ำหนักโมเลกุล	418.5
คุณสมบัติ	สามารถละลายได้ในน้ำ, แอลกอฮอล์, เมทานอล

(Windholz, Budavari, Stroumisos, & Ferti, 1976)

การใช้ประโยชน์ของสีมาลาไคน์กรีน

1. ในอุตสาหกรรมการทอผ้าใช้เป็นสีย้อมผ้า
2. ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นำมาเป็นส่วนผสมในน้ำยาฆ่าเชื้อ เช่น น้ำยาฆ่าเชื้อรา, น้ำยาฆ่าเชื้อพาราสิต, น้ำยาฆ่าแบคทีเรียและน้ำยาฆ่าโปรโตซัว (Foster & Woodbury, 1936; Clifton-Hadley & Alderman, 1987 citing Srivastava et al., 1995)

โทษของสีมาลาไคน์กรีน

1. มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Clemmensen et al., 1984; Panadiker et al., 1992; Rao, K.V.K., 1995 citing Henderson et al., 1997)
2. ทำให้เกิดเนื้องอกในตับของหนูทดลอง
3. เป็นสาเหตุของความผิดปกติในระบบสืบพันธุ์ของกระด่าและปลา (Fernandes et al., 1991; Rao, K.V.K., 1995 citing Henderson et al., 1997)
4. เป็นสารก่อโรคมะเร็งในคน (Srivastava et al., 1995)

5. **ความเป็นพิษของสีย้อม** จากรายงานของนันทยา ขานูมาศ (2539) ได้กล่าวถึงความ เป็นพิษของสีย้อมไว้ว่า สีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ ซึ่งศึกษาจากประวัติที่มีการเก็บรวบรวม ข้อมูลในต่างประเทศที่ไม่พบว่า ผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมจะมีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วย สูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่น ๆ แต่สีย้อมสามารถเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ

5.1 โดยทางจมูกด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ

5.2 โดยการสัมผัสทางผิวหนัง

5.3 โดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน

ความเป็นพิษของสีย้อม ถ้าหากรับประทานเข้าไปจะเห็นได้จากค่า LD_{50} ที่แสดงในตาราง 2

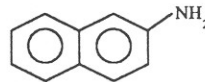
ตารางที่ 2 ค่า LD_{50} ของสีย้อมสิ่งทอ (นันทยา ขานูมาศ, 2539)

ค่า LD_{50} (มก./กก)	จำนวนสีย้อม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 5,000	82%
2,000-5,000	10%
ต่ำกว่า 250	น้อยกว่า 1% (ประมาณ 15 สีย้อม)

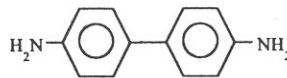
หมายเหตุ โซเดียมไฮยาโนไซด์ซึ่งถือว่าเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงมีค่า $LD_{50} = 15$ มก./กก.

ในการศึกษาความเป็นพิษของสีย้อมจากค่า LD_{50} ที่ทำการศึกษาดังปริมาณสารที่ให้กับหนูทดลอง ดังตาราง 2 พบว่าสีย้อมโดยทั่วไปมีความเป็นพิษต่ำ แต่จากกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมนั้นจะต้องใช้วัตถุดิบที่มีความเป็นพิษสูง และมีวัตถุดิบหลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง ตัวอย่างเช่น

2-แนฟธิลเอมีน (2-naphthylamine)



และเบนซิดีน (benzidine)



จากข้อมูลในตาราง 2 สอดคล้องกับการรายงานของ อังคณา ศุภย์ไตรรัตน์ (2540) ที่กล่าวถึงความเป็นพิษของสีย้อมเมื่อได้รับทางปากว่ามีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำคือ ปริมาณสีย้อมมากกว่า 80% มีค่า LD_{50} (หนู, ทางปาก) มากกว่า 5,000 มก./กก. และปริมาณสีย้อมน้อยกว่า 1% (ประมาณ 15 สีย้อม) มีค่า LD_{50} (หนู, ทางปาก) น้อยกว่า 250 มก./กก.

นอกจากความเป็นพิษของสีย้อมที่ควรทราบเพื่อป้องกันอันตรายจากสีย้อมแล้ว อังคณา ศุภย์ไตรรัตน์ (2540) ได้กล่าวถึงอันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษของสีย้อม เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการใช้สีย้อม

6. อันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษของสีย้อม สีย้อมสามารถสร้างอันตรายต่อมนุษย์ได้ โดย

6.1 อันตรายของสีย้อมผิวหนัง (skin sensitization) ความเป็นไปได้ของการเกิดโรคผิวหนังจากการสัมผัสกับสีย้อมมีความเป็นไปได้ต่ำมาก แต่ก็มีบางคนที่เกิดโรคผิวหนังจากการสัมผัสกับสีย้อมนี้เรียกกันว่า “Panty-hose syndrome” ซึ่งจากการรายงานของอังคณา ศุภย์ไตรรัตน์ (2540) ได้กล่าวว่าแม้ความเป็นพิษของสีย้อมค่อนข้างต่ำ แต่ผู้ใช้สีย้อมอาจเกิดอาการแพ้พิษจากสีย้อมได้ เช่น การผลิตถุงน่องที่ทำจากกำมะหยี่ สีที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสีดิสเพส ซึ่งมีโครงสร้างของสีย้อมเป็นพวกอะโซ และแอนทราควิโนน เมื่อมีการใช้ถุงน่องในบริเวณที่มีความอับชื้น อาจทำให้เกิดความระคายเคืองจากการแพ้ได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันที่เหมาะสมที่สุด การทำให้ผู้ใช้สีย้อมตระหนักถึงอันตรายของสีนั้นโดยการติดคำเตือนบนฉลากจะช่วยทำให้ผู้ใช้นั้นใจและไม่ประมาทต่อการใช้สีย้อม

6.2 อันตรายของสีย้อมระบบทางเดินหายใจ (respiratory sensitisation) ความไวของระบบทางเดินหายใจเป็นสิ่งที่ร่างกายใช้ในการป้องกันความเป็นพิษของสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว (แต่ไม่ทุกกรณี) ร่างกายจะสร้าง IgE (เป็นสารต่อต้านเชื้อโรคประเภทแอนนาฟิแลคติกในมนุษย์และหนู) ซึ่งเฉพาะเป็นพิษนั้น ๆ ส่งผลให้มีอาการของโรคระบบทางเดินหายใจหรือทำให้มีอาการทรมานทรมานเมื่อสูดดมสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้เข้าไป โรคระบบทางเดินหายใจที่เกิดจากภูมิแพ้ต่าง ๆ ได้แก่ โรคหืดหอบของหลอดลมและโรคเยื่อจมูกอักเสบ (ซึ่งอาจมีอาการไข้เมื่อสูดเอาละอองเกสรดอกไม้เข้าไป)

ตัวอย่างเช่น ภูมิแพ้ที่เกิดในระบบทางเดินหายใจเมื่อมีการสัมผัสกับสีย้อมแอทิล การสัมผัสหรือสูดดมสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้นั้นอาจทำให้เกิดแอนนาฟิแลคติกช็อก (anaphylactic shock) ซึ่งอาจเกิดอาการชักตามมาจนถึงขั้นโคม่าและอาจทำให้เสียชีวิตได้ในที่สุด การเกิดภูมิแพ้ในระบบทางเดินหายใจอาจเกิดจากการถ่ายทอดทางกรรมพันธุ์หรือเกิดจากสาเหตุอื่น

6.3 ความสามารถในการก่อมะเร็ง (carcinogenicity) จากการศึกษาของศูนย์วิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) ได้ประเมินความสามารถในการก่อมะเร็งของสีย้อมที่มีเบนซีดินเป็นส่วนประกอบไว้ว่า สีย้อมดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ ซึ่งสีย้อมอะโซเป็นสีที่รู้จักกันสามารถก่อมะเร็งได้ จากข้อมูลของประเทศเยอรมันพบว่า สีย้อมอะโซซึ่งหลังการแตกตัวของกลุ่มอะโซแล้วจะให้อะโรมาติก และมีการประมาณกันว่ามีสีย้อมอะโซทั้งสิ้น 150 ตัว สามารถแตกตัวให้อะโรมาติก แอมินที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ และมีอะโรมาติกแอมินที่ก่อมะเร็งเพียง 15 ตัว เท่านั้นที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมสี โดยทั่วไปแล้วสีย้อมอะโซจะไม่แตกตัวให้อะโรมาติกแอมินที่ก่อมะเร็ง แต่จะแตกตัวให้กรด

อะโรมาติกอะมิโนซัลโฟนิก (aromatic aminosulphonic acid) ซึ่งไม่ก่อหรือมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก

นอกจากจะแตกตัวให้อะโรมาติกแอมีนที่ก่อให้เกิดมะเร็งแล้ว สีข้อมะไซบางตัวยังแตกตัวให้ออโร-ไดอานิสิดีน (o-dianisidine) หรือออโร-โทลิดีน (o-tolidine) ซึ่งก็เป็นสารก่อมะเร็งเช่นกัน ตัวอย่างสีข้อมที่ก่อให้เกิดมะเร็งเช่น CI Acid Red 114 (ซึ่งมีออโร-โทลิดีน) และ CI Direct Blue 15 (ซึ่งมีออโร-ไดอานิสิดีน)

7. **มลพิษของสีข้อมต่อสิ่งแวดล้อม** สีข้อมที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสามารถเห็นได้ง่ายแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีข้อมที่ปล่อยสู่แม่น้ำแล้วสังเกตเห็นได้ คือ 0.1-1.0 มก./ลิตร (อังคณา ตูลย์ไครรัตน์, 2540) ปัญหาสำคัญของสีข้อมในน้ำที่ปัจจุบันไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีข้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำที่ สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ เนื่องจากสีข้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็น จึงทำให้มีความจำเป็นต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้ง แม้ว่าสีนั้นจะมีความเป็นพิษต่ำ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองค่าความเป็นพิษต่อปลาที่แสดงในตาราง 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่าความเป็นพิษของสีข้อมต่อปลา (Fish toxicity) (นันทยา ขานูมาศ, 2539)

LC ₅₀ (มก./ลิตร)	จำนวนสีข้อม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
น้อยกว่า 1	2%
1-10	1%
10-100	27%
100-500	31%
มากกว่า 500	38%

สำหรับผลกระทบของสีข้อมต่อสิ่งแวดล้อมนั้นพบว่า สีข้อมมีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ทำให้สีข้อมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมยังคงอยู่

8. **การบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตสีข้อม** การบำบัดน้ำทิ้ง คือ การเปลี่ยนสารประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสียให้เป็นสารออกซิไคซ์คงตัว ซึ่งสามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะอย่างปลอดภัย ไม่มีผลเสียต่อระบบนิเวศน์และยังป้องกันผลเสียทางด้านสุขอนามัย ไม่ให้เกิดความรำคาญ มีกลิ่นเหม็น (สุวศา กานตวนิชกูร, 2538)

โดยปกติธรรมชาติสามารถปรับสภาพน้ำทิ้งได้ หรือเรียกว่าเป็นการฟอกตัวของน้ำ (self purification) ถ้าปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้งไม่มากจนเกินไป แต่สำหรับใน

อุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมนั้น การบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมโดยส่วนใหญ่ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักจะนิยมใช้การบำบัดทางเคมี (Reife & Freeman, 1996 citing Razo-Flores et al., 1997) เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตสีย้อมจะมีสีย้อมที่ผลิตขึ้นบางส่วนปะปนมากับน้ำทิ้งและพบว่าสภาพของน้ำทิ้งมีสีเข้มและมีความเป็นพิษค่อนข้างสูง ดังนั้นในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการทางเคมีจึงเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น ๆ

การบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางเคมีของโรงงานผลิตสีย้อม โดยส่วนมากการใช้สารเคมีจะใช้เพื่อบำบัดให้เกิดการตกตะกอนของสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งการใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอนถือได้ว่าเป็นวิธีที่สะดวกที่สุดในการกำจัดมลพิษออกจากรน้ำทิ้งและช่วยทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีขึ้น ดังเช่นการทดลองของชนินฐา เจริญลาภ (2544) ได้ใช้สารเคมีอลูมิเนียมซัลเฟต โพแทสเซียมคลอไรด์, เฟอร์ริกคลอไรด์, เฟอร์ริกซัลเฟต และเฟอร์รัสซัลเฟต เป็นสารตกตะกอนสีดิสเพส, สีไครเรกและสีรีแอคทีฟ นอกจากนั้นยังใช้ปูนขาวเป็นสารช่วยในการตกตะกอนของสีซึ่งให้ผลดีมีประสิทธิภาพเป็นต้น แต่วิธีนี้ก็ค่อนข้างค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ต้นทุนการผลิตสีย้อมสูงขึ้น

ดังนั้นจึงมีการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสีย้อมด้วยวิธีทางชีววิทยาแทนวิธีทางเคมีซึ่งวิธีทางชีววิทยาเป็นวิธีการกำจัดมลพิษวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ วิธีที่นิยมใช้คือ ตะกอนเร่ง เป็นการใช้อุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งวิธีนี้สามารถลดมลพิษจาก 100% เหลือเพียง 60% โดยการย่อยสลายทางชีววิทยาและองค์ประกอบของชีโอดี/บีโอดีจะถูกย่อยสลายไปเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณของเสียลดลงอย่างชัดเจน วิธีนี้จะตรงกันข้ามกับการตกตะกอนด้วยตัวตกตะกอน เนื่องจากสารมลพิษทั้งหมดจะถูกกำจัดในรูปของสลัดจ์ (นฤมล ศิริทรงธรรม, 2539)

9. วิธีตะกอนเร่ง (activated sludge) วิธีตะกอนเร่งเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ปฏิกิริยาการทำความสะอาดของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ในน้ำเพื่อสร้างพลังงานและเซลล์ใหม่ (สุวศา กานตวนิชกุล, 2538) หรืออาจเรียกได้ว่า จุลินทรีย์ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสาร วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย สิ่งสำคัญที่จะต้องควบคุมคือ สภาพต่าง ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของจุลินทรีย์

9.1 pH ค่า pH จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในวิธีการตะกอนเร่ง ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่สุดในช่วง pH 6-7 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ pH 7 แต่ถ้าน้ำมี pH นอกเหนือจากช่วงดังกล่าว ความสามารถในการทำปฏิกิริยาก็จะลดลง และถ้า pH มีค่าต่ำกว่า 4 คือ มีสภาพเป็นกรดหรือสูงกว่า 10 คือ มีสภาพเป็นด่าง ปฏิกิริยาจะไม่เกิดขึ้นและระบบก็จะล้มเหลว

9.2 อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาจะลดลงเป็นอัตราส่วนต่อการลดลงของอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าที่ช่วงกำหนด การทำปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงดังนี้

ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 45 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาจะลดลงครึ่งหนึ่งของการทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส

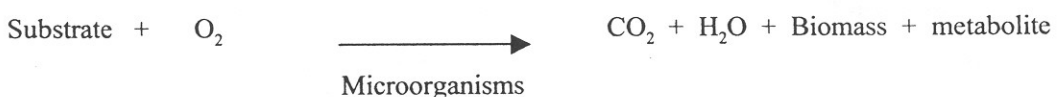
ถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 50 องศาเซลเซียสจะไม่เกิดการทำปฏิกิริยา

9.3 ความเข้มข้นของสลัดจ์ ความเข้มข้นของสลัดจ์ยิ่งมากประสิทธิภาพของกระบวนการยิ่งดี ซึ่งปริมาณสลัดจ์และ MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) จะบอกถึงปริมาณตะกอนและความสมบูรณ์ของตะกอนแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงจนเกินไปการแยกตัวของสลัดจ์ในบ่อดักตะกอนจะเกิดขึ้นได้ยาก โดยทั่วไปแล้วค่า MLSS สำหรับระบบตะกอนเร่งในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมควรอยู่ในช่วง 2,000-10,000 ppm

9.4 สมดุลของสารอาหาร สารอาหารหลักของจุลินทรีย์ในน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของระบบตะกอนเร่งก็คือ สารไฮโดรคาร์บอนหรือไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัส ซึ่งก็เป็นสารอาหารที่จำเป็น สัดส่วนของปริมาณคาร์บอน: ไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมักเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ฉะนั้นสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์จึงมักไม่ค่อยสมดุลกัน สภาวะที่ดีของสมดุลอาหารในระบบตะกอนเร่ง ควรมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอน: ไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส = 100: 5: 1 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุมน, 2535; อังคณา ศุลย์ไธรัตน์, 2540)

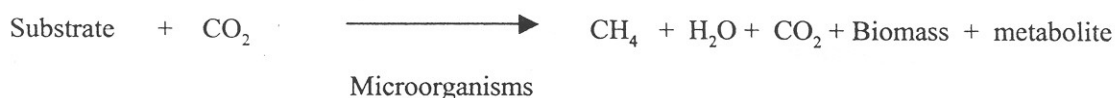
10. กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation Process) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการนำจุลินทรีย์ในการกำจัดสารอินทรีย์หรือใช้สารพิษนั้น ๆ เป็นอาหารของจุลินทรีย์โดยที่จุลินทรีย์อาจเป็นแบบที่ใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำให้สารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมน้อยลง

10.1 สภาวะแอโรบิก (aerobic conditions)



ในสภาวะที่ใช้ ออกซิเจนตัวรับอิเล็กตรอน คือ ออกซิเจน เมื่อจุลินทรีย์ออกซิไดส์สารอินทรีย์ แล้วจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

10.2 สภาวะเมทาโนจีนิก (methanogenic conditions)



ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนตัวรับอิเล็กตรอน คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อจุลินทรีย์รีดิวส์สารอินทรีย์แล้วจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซมีเทน (มันสิน คัมพุลเวศน์, 2542)

10.3 สภาวะดีไนตริฟิเคชัน (denitrification conditions)



ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน ตัวรับอิเล็กตรอน คือ ไนเตรต เมื่อจุลินทรีย์รีดิวส์สารอินทรีย์แล้วจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซไนโตรเจน (ศุวศา กานตวนิชกุล, 2538)

ตอนที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโดยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสีย้อม ส่วนใหญ่ทำการศึกษาในสีย้อมบริสุทธิ์ โดยจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสีย้อมได้ มีทั้งแบคทีเรียและราดังนี้

บราวน์ และลาบอเรอร์ (Brown & Laboureur, 1983) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการย่อยสลายสีทางชีวภาพขั้นต้นของน้ำเสียจากการฟอกย้อมภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก ทำการทดลองกับสีย้อม 22 ชนิด โดยใช้แบคทีเรียจากโรงบำบัดน้ำเสียที่บำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นหลัก แล้วทำการทดลองในขวดแก้วที่ปิดสนิท มีวาล์วสำหรับระบายก๊าซที่เกิดขึ้น ประกอบเข้ากับเครื่องกวนด้วยแม่เหล็กและควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส โดยสีย้อมที่นำมาใช้ในการทดลองแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้แก่ สีย้อมชนิดแอซิด, เบสิก, มอร์แดนต์, ไคเร็กและรีแอ็กทีฟที่มีโครงสร้างแตกต่างกันดังนี้ โมโนอะโซ, ไดอะโซ, โพลีอะโซ, แอนทราควิโนน, ไตรฟีนิลมีเทน, สติลบิน, อ็อกซาซีน, Phtalocyanine, ไนโตรและมีทีน ซึ่งผลการย่อยสลายทางชีวภาพของสีย้อมโมโนอะโซ 4 ชนิด และไดอะโซ 6 ชนิด ปรากฏว่าสามารถย่อยสลายได้ดี แต่ในงานวิจัยของ วูร์แมนน์, แมชส์เนอร์, และแคปเปเลอร์ (Wuhrmann, Mechsner, & Kappeler, 1980) และวอล์คเกอร์ (Walker, 1970) กล่าวว่า สีย้อมอะโซจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และอาจเกิดการแตกพันธะอะโซในกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่เกดสารที่เป็นพิษขึ้น ส่วนสีโพลีอะโซ, แอนทราควิโนนและอื่น ๆ นั้นสามารถลดสีได้พอสมควร แต่ก็มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการลดสีโมโนอะโซและไดอะโซ หรือกล่าวได้ว่าสีย้อมโพลีอะโซถูก

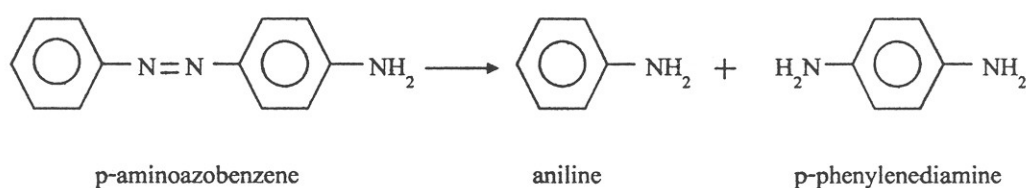
สมของสีย้อมแต่ละชนิด และยังพบอีกว่า ในสภาวะที่มีอาหารเหลวในโตรเจนสูงเชื้อราไม่สามารถย่อยสลายสีได้แต่สามารถตรวจพบกิจกรรมของเอนไซม์ในกลุ่มย่อยสลายลิกนินได้ ยกเว้น เอนไซม์ลิกนินเพอร์ออกซิเดส แต่เมื่อทำการเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลวที่มีความเข้มข้นในโตรเจนต่ำ พบว่ามีการย่อยสลายเกิดขึ้นและสามารถตรวจพบกิจกรรมของเอนไซม์ลิกนินเพอร์ออกซิเดสได้

แนปป์ และนิวบาย (Knapp & Newby, 1995) ศึกษาแบคทีเรียในเชื้อผสมในการกำจัดสี กลุ่มไคอะโซจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิต Nitrated Stilbene Sulphonic Acid (NSSA) พบว่ามีแบคทีเรียในเชื้อผสมประมาณ 20 ชนิดที่สามารถกำจัดสีได้ดีภายใน 15 วันของการบ่มเชื้อในสภาวะแอนแอโรบิก โดยสามารถลดสีอะโซได้อย่างน้อยร้อยละ 77 และกำจัดสีได้ดีที่สุดถึงร้อยละ 85 และในการทดลองที่ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นสูง ๆ (2%) ไม่ได้ช่วยให้การกำจัดสีดีขึ้นและอาจเกิดการยับยั้งการลดสี และในการทดลองที่ใช้สารอาหารที่มีโปรตีนสูง ได้แก่ Nutrient Broth และ Brain Heart Infusion ทำให้เกิดการกำจัดสีได้ร้อยละ 77 และ 80 ตามลำดับ ภายในเวลา 3 วันของการบ่มเชื้อ จากการวิเคราะห์แยกสารด้วย Thin Layer Chromatography (TLC) พบว่าจุดที่แสดงตำแหน่งโครโมฟอร์ของสีหายไปและพบสารใหม่เกิดขึ้นในโครมาโตแกรม เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านระบบแอนแอโรบิกมาคัดแยกเชื้อจะพบแบคทีเรียจีส *Bacillus* และ *Clostridium* sp.

ไนแกม, บานัท, ซิงค์, และมาร์แซนท์ (Nigam, Banat, Singh, & Marchant, 1996) ศึกษาการลดปริมาณสีของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ PDW ซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ได้รับการรับรองของบริษัท N.C.I.M.B. ประเทศอังกฤษ โดยนำกลุ่มจุลินทรีย์ดังกล่าวมาย่อยสลายน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน พบว่าการที่จะลดปริมาณสีลงได้จะต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนและแหล่งให้พลังงานลงไปในน้ำเสีย ซึ่งแหล่งคาร์บอนและแหล่งให้พลังงานที่เติมลงไปจะหาได้ง่ายและมีราคาถูก เช่น แลคโตส และแป้ง ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์นี้สามารถกำจัดสีลงได้ 76% ภายในเวลา 3 วัน

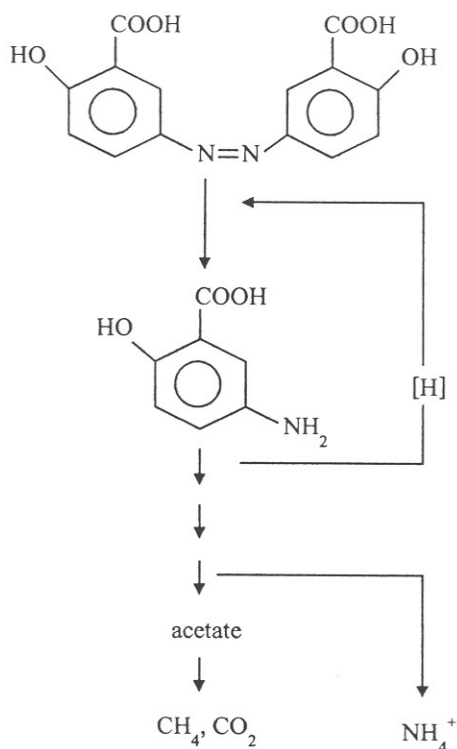
วอง และยูน (Wong & Yuen, 1996) ศึกษาการย่อยสลายสี methyl red โดยใช้แบคทีเรีย *Klebsiella pneumoniae* RS13 ที่สามารถคัดแยกได้จากสลัดจ์ที่มีการปนเปื้อนของสีกลุ่มอะโซและ methyl red ซึ่งในการศึกษาการย่อยสลายสี methyl red จะทำการศึกษาการย่อยสลายภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกโดยศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ, ความเข้มข้นกลูโคส, ความเข้มข้นเอทานอล, ความเข้มข้นแอมโมเนียซัลเฟตและพีเอช ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าแบคทีเรีย *K. pneumoniae* RS13 สามารถย่อยสลายสี methyl red ได้ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จนถึงความเข้มข้น 100 มก.ต่อลิตร ซึ่งถือเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้

ซีสซี และไลเบอร์ราทอส (Zissi & Lyberatos, 1996) ได้ศึกษาการย่อยสลาย *p*-aminoazobenzene ซึ่งเป็นโครงสร้างหนึ่งของสีอะโซภายใต้สภาวะดีไนตริฟิเคชันโดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เนื่องจาก *B. subtilis* มีความสามารถในการใช้ในเตรทหรือไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายภายใต้สภาวะดีไนตริฟิเคชันได้ เมื่อ *B. subtilis* ย่อยสลาย *p*-aminoazobenzene โดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน จะได้สารตัวกลาง 2 ชนิด คือ aniline และ *p*-phenylenediamine ซึ่งเกิดจากการสลายพันธะ N=N ภายใต้สภาวะดีไนตริฟิเคชัน ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การย่อยสลาย *p*-aminoazobenzene ภายใต้สภาวะดีไนตริฟิเคชัน

ราโซ ฟลออร์ และคณะ (Razo-Flores et al., 1997) ศึกษาการลดสีโดยใช้ระบบไร้อากาศแบบยูเอเอสบีขนาด 160 มล. ทำการทดลองกับสีอะโซ 2 ชนิด คือ Mordant Orange I (MO I) และ Azodisaliclylate (ADS) ผลการทดลองพบว่าระบบยูเอเอสบีนี้มีประสิทธิภาพในการลดสีทั้งสองชนิด เมื่อมีการเติมแหล่งคาร์บอนเสริมเพื่อเป็น cosubstrate ซึ่งมีทั้งการใช้กระดาษเย็บง่ายและกลูโคส และพบว่ากลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดีกว่ากระดาษเย็บง่าย เนื่องจากทำให้ระบบสามารถรับภาระบรรทุกสีได้มากกว่า 2 เท่า โดยในการทดลองลดสี MO I เห็นได้ว่ามีสาร 5 - amino salicylic acid (5 - ASA) และ 1,4 - phenylenediamine เกิดขึ้นเป็นสารอินเทอร์มีเดียทที่เกิดจากการสลายพันธะอะโซและหลังจากที่ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลาสั้น ปรากฏว่าสาร 5-ASA ซึ่งเป็นสารอะโรมาติกเอมีนสามารถย่อยสลายจนสมบูรณ์ได้ต่อไป ส่วนสี ADS ซึ่งเป็นสีที่ใช้ในการผลิตยามีส่วนประกอบของสาร 5 - ASA อยู่ 2 หน่วย/โมเลกุลสี สามารถสลายตัวอย่างสมบูรณ์ (mineralization) แม้ว่าจะไม่มีการเติมอาหารเสริมให้แก่อำนาจการย่อยสลายสาร 5 - ASA เกิดจากการใช้สาร 5 - ASA เป็นสารให้อิเล็กตรอนกับการสลายพันธะอะโซ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การย่อยสลายสีที่สมบูรณ์โดยกระบวนการชีวภาพของ ADS ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ทาตาโกะ และบัมพ์ส (Tatarko & Bumpus, 1997) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อม Congo Red โดยใช้เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* โดยทำการทดลองในอาหารเลี้ยงเชื้อมอลต์สกัดทั้งในอาหารเหลวและอาหารวุ้นที่มีสีย้อม Congo Red ผสมอยู่พบว่า สีย้อมจะถูก adsorbed โดยเชื้อราดังกล่าวซึ่งเชื้อราชนิดนี้สามารถย่อยสลายสีย้อม Congo Red ได้ถึง 718 ไมโครโมลาร์ (500 มก./ลิตร) ในอาหารแข็งมอลต์สกัด 2% อีกทั้งเชื้อราชนิดนี้สามารถกำจัดสีของสีย้อม Congo Red ได้เมื่อมีการเติมแหล่งไนโตรเจนเข้าไป ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าแหล่งไนโตรเจนที่เติมลงไปเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ผลจากงานวิจัยนี้ยังสามารถสรุปได้อีกว่า สีย้อม Congo Red สามารถที่จะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต lignin peroxidase H8 ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เชื้อราผลิต

โอนีล, โลเปซ, อีสตีฟ, ฮอกส์, และวิลคอกซ์ (O'Neill, Lopez, Esteves, Hawkes, & Wilcox, 2000) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและแอโรบิกโดยใช้ตัวอย่างสี Procion Red H-E7B ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน การย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะโซจะเกิดการย่อยที่พันธะอะโซโดยใช้ปฏิกิริยา reduction ผลที่เกิดจากการย่อยในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จะเกิดสารพวก aromatic amines ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็งที่สำคัญ

ในสถานะแอนโรบิกจะเป็นสถานะที่เมื่อเกิดการย่อยแล้วสามารถสังเกตได้จากลักษณะของสีที่จางลง หลังจากนั้นก็ทำการย่อยสลายต่อในสถานะแอนโรบิก สำหรับสาร aromatic amines ที่เกิดขึ้นจะถูกย่อยสลายต่อไปในสถานะแอนโรบิกและทำการตรวจวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง High -Performance Liquid Chromatography/Ultra Violet (HPLC-UV) ในการศึกษาการย่อยสลายสี Procion Red H-E7B

ราจากรู และคณะ (Rajaguru et al., 2000) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนต่อด้วยสภาวะที่มีออกซิเจน โดยใช้จุลินทรีย์ผสมที่คัดแยกได้จากดินในการย่อยสลายสีอะโซกลุ่มซัลโฟเนท คือ สี Orange G, Amido black, Direct red และ Congo red พบว่าเมื่อทำการย่อยสลายสีย้อมภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยใช้กลูโคสเป็น Co-substrate สามารถที่จะลดสีอะโซได้ และเกิดสารเอมีนหลังจากนั้นทำการย่อยสลายต่อภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดเดิม พบว่าภายใต้สภาวะนี้สามารถย่อยสลายสารเอมีนได้

ครุซ และบิวตรอน (Cruz & Buitron, 2001) ศึกษาการย่อยสลายสี disperse blue 79 (DB79) ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนต่อด้วยสภาวะที่มีออกซิเจนโดยใช้ Biofilter พบว่าเมื่อเริ่มทำการทดลองในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนโดยใช้ Biofilter สี DB79 จะถูกเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบเอมีน โดยสามารถลดสีลงได้ถึง 95% ภายในเวลา 72 ชั่วโมง และต่อมาเมื่อนำสารประกอบเอมีนมาย่อยสลายต่อในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยใช้ Biofilter สารประกอบเอมีนก็จะถูกย่อยสลายไป ซึ่งมีประสิทธิภาพถึง 65% ภายในเวลา 24 ชั่วโมง