

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตอนที่ 1 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

1. สีย้อมอุตสาหกรรม
2. กระบวนการผลิตสีย้อมอุตสาหกรรม
3. ความเป็นพิษของสีย้อมอุตสาหกรรม
4. มลพิษทางสิ่งแวดล้อมของสีย้อมอุตสาหกรรม
5. กระบวนการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อม
6. การบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการดูดซับ
7. การบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge)

ตอนที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตอนที่ 1 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

1. สีย้อมอุตสาหกรรม

1.1 ความหมายของสีย้อม

สีย้อม หมายถึง สารที่อาจละลายหรือแขวนลอย เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการย้อม โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว โดยจะเกิดพันธะไอออนิกหรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonds) กับวัตถุนั้น ๆ (อังคณา ตูลย์ไตรรัตน์, 2540) อีกความหมายหนึ่งอาจหมายถึง สารมีสีที่ละลายน้ำได้ หรืออาจทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ เวลาใช้มักจะถูกดูดซึมเข้าไปในวัสดุที่ถูกย้อมจากสารละลายน้ำ (สีย้อม, 2544 ก)

1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม การจำแนกประเภทของสีย้อมสามารถทำได้

ดังนี้

1.2.1 การจำแนกตามแหล่งที่มาของสี

1.2.1.1 สีย้อมธรรมชาติ ได้แก่ พืช สัตว์ และอนินทรีย์สารต่าง ๆ

1.2.1.2 สีย้อมสังเคราะห์ ได้แก่ สีผลิตจากการสังเคราะห์ทางเคมี

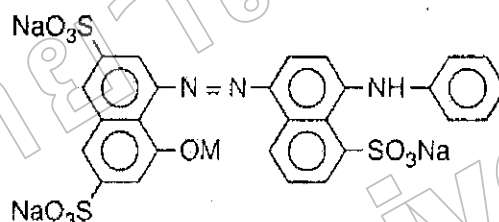
ผลจากการค้นพบวิธีสังเคราะห์สีย้อมทำให้เกิดมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาวิธีสังเคราะห์สีใหม่ ๆ ขึ้นอย่างกว้างขวางในประเทศต่าง ๆ โดยเฉพาะในประเทศเยอรมัน อังกฤษ และสหรัฐอเมริกา (สีย้อม, 2544 ก) ทำให้ความนิยมใช้สีธรรมชาติลดน้อยลง ในปัจจุบันสีสังเคราะห์ได้เข้ามาแทนที่สีธรรมชาติเกือบทั้งหมดแล้ว เนื่องจากกรรมวิธีการสกัดสีย้อมธรรมชาติ

ค่อนข้างยุ่งยาก ความไม่แน่นอนของเจดสีที่ได้ และปัญหาเรื่องความคงทนของสีธรรมชาติ
(Colour chemistry, 2003)

1.2.2 การจำแนกสีย้อมตามกรรมวิธีการย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 11 ประเภท

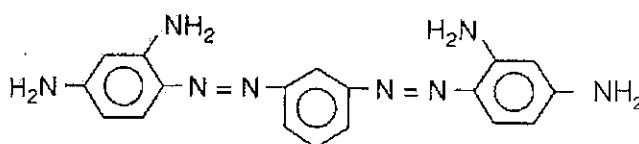
ดังนี้คือ

1.2.2.1 สีแอสิด (Acid Dyes) คือ สีย้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุลบและมักจะใช้ย้อมในน้ำย้อมที่มีความเป็นกรด ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนได้ดี การติดสีของสีย้อมประเภทนี้อาศัยแรงไอออนิก (Ionic Forces) ระหว่างประจุลบบนโมเลกุลสีกับประจุบวกบนโมเลกุลของเส้นใย และมักมีหมู่ซัลโฟนิค (Sulphonic Group) ซึ่งให้ประจุลบในน้ำ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างสีแอสิด บลู 92 (Acid Blue 92) (สีย้อม, 2544 ก)

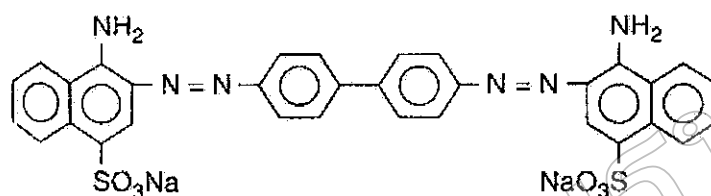
1.2.2.2 สีเบสิค (Basic Dyes) คือ สีย้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำโมเลกุลสีจะมีประจุบวกใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิกโปรตีน และไนลอนได้ดี การติดสีของสีย้อมประเภทนี้อาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสีย้อมกับประจุลบบนเส้นใย ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างสีเบสิค บราว 1 (Basic Brown 1) (สีย้อม, 2544 ก)

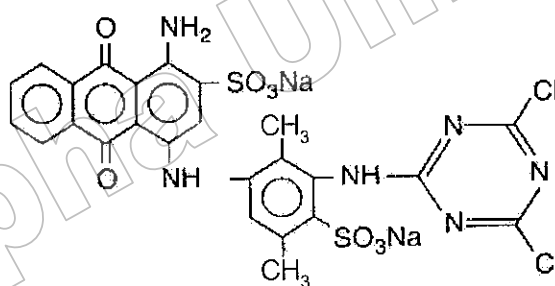
1.2.2.3 สีไดเรกต์ (Direct Dyes) คือ สีย้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุลบ ใช้ย้อมพวกเส้นใยเซลลูโลสได้ดี และโดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพวกอะโซซึ่งเป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิค (Sulphonic Acid) ทำให้ตัวสีย้อมละลายน้ำได้ง่าย การติดสีบนโมเลกุล

ของเส้นใยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals's Forces) ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-3



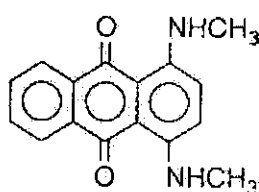
ภาพที่ 2-3 โครงสร้างสีแดงเร็กซ์ เรด 14 (Direct Red 14) (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.2.4 สีย้อมแอคทีฟ (Reactive Dyes) คือ สีย้อมที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใย ทำให้เกาะติดอยู่กับโมเลกุลของเส้นใยได้โดยเกิดพันธะโควาเลนต์กับ OH, SH และ NH₂ Group ของเส้นใย ส่วนใหญ่สีประเภทนี้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-4



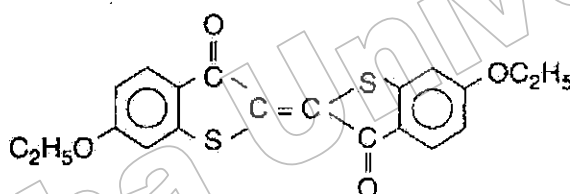
ภาพที่ 2-4 โครงสร้างสีย้อมแอคทีฟ บลู 4 (Reactive Blue 4) (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.2.5 สีย้อมเฟส (Disperse Dyes) คือ สีย้อมที่มีการละลายน้ำได้ต่ำ ใช้ย้อมเส้นใยที่มีการดูดซึมน้ำน้อย (Hydrophobic Fibers) โดยเฉพาะพวกเส้นใยสังเคราะห์ต่าง ๆ ได้ดี สภาพที่อยู่ในน้ำส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ แต่อยู่ในลักษณะของสารกระจาย (Dispersion) ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-5



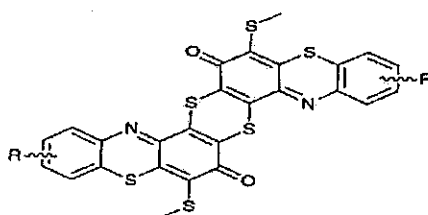
ภาพที่ 2-5 โครงสร้างสีติดเพิล บลู 14 (Disperse Blue 14) (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.2.6 สีแว๊ท (Vat Dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำที่มีหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) อยู่ ปกติใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ ในการย้อมจะต้องนำสีย้อมมาทำปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) กับสารรีดิวซิ่ง เช่น โซเดียมไดไทโอไนต์ ให้อยู่ในรูปที่ละลายได้ในน้ำ (Leuco) เพื่อให้ดูดซึมเข้าไปในเส้นใยได้เมื่อย้อมเสร็จแล้วจึงทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ให้กลับไปอยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-6



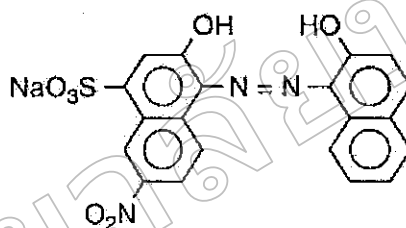
ภาพที่ 2-6 โครงสร้างสีแว๊ทออเรนจ์ 5 (Vat Orange 5) (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.2.7 สีซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารรีดิวซิ่งทำให้น้ำมีสภาพเป็นด่าง และมีซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปของซัลไฟด์ ($-S-$), ไดซัลไฟด์ ($-S-S-$) และโพลีซัลไฟด์ ($-S_n-$) เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างที่ทำให้เกิดสี ใช้ในการย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 โครงสร้างสีซัลเฟอร์ (Christie, 2001)

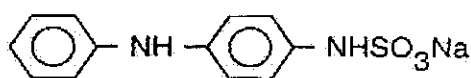
1.2.2.8 สีมอร์แดนต์ (Mordant Dyes) คือ สีย้อมที่เกาะติดอยู่ในเส้นใย ในลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ เช่น เหล็ก โคบอลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครเมียมส่วนใหญ่ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีนและในล่อน การย้อมในขั้นตอนแรกเป็นไปอย่างธรรมดาคล้ายการย้อมด้วยสีแอสิด แต่เมื่อเสร็จแล้วจะต้องนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือของโลหะโครเมียม เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นในเส้นใย ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างสีมอร์แดนต์ แบล็ค 1 (Mordant Black 1) (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.2.9 สีอะโซอิก (Azoic Dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นภายในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาเคมี (Coupling Reaction) ระหว่างเกลือไดอะโซเนียม (Diaz Component) กับสารประกอบที่เหมาะสม (Coupling Component) เกิดเป็นสีย้อมที่มีสูตรโครงสร้างของสีอะโซ สีย้อมประเภทนี้นิยมใช้กับการย้อมเส้นใยฝ้าย

1.2.2.10 สีออกซิเดชัน (Oxidation Dyes) คือ สีย้อมที่สามารถถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ภายหลังที่ได้ย้อมให้เข้าไปเกาะติดในเส้นใยแล้วสีพวกนี้เมื่อถูกออกซิไดซ์ในเส้นใยจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ตัวอย่างสีและสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 โครงสร้างสีออกซิเดชัน เบส 3 (Oxidation Base 3) (สีย้อม, 2544 ก)

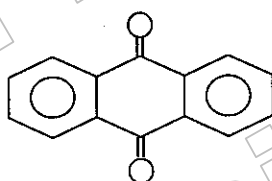
1.2.2.11 สีอินเกรน (Ingrain Dyes) คือ สีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวกลาง (Intermediates) ในเส้นใย นอกเหนือจากพวกที่สีอะโซอิก ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ สีฮอลโลไซยานิน ซึ่งให้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี อาจจำแนกโดยละเอียดได้ 20 ประเภท แต่สีย้อมที่มีความสำคัญมี 5 ประเภทโดยเรียงลำดับตามปริมาณสีที่ใช้จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ (สีย้อม, 2544 ก)

1.2.3.1 สีอะโซ (Azo Dyes) มีกลุ่ม $-N=N-$ เป็นโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

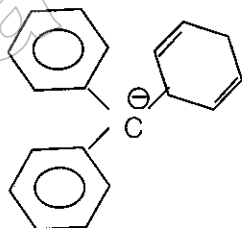
1.2.3.2 สีแอนทราควินอน (Anthraquinone) มีโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

ดังนี้



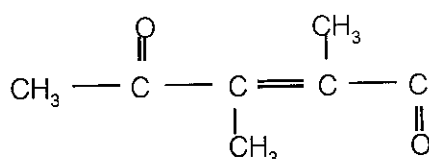
1.2.3.3 สีไตรฟีนิลมี (Triphenylmethene Dyes) มีโครงสร้างที่สำคัญใน

โมเลกุลดังนี้



1.2.3.4 สีซัลเฟอร์ มีโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุลดังนี้ D-S-S-D (D = Dye)

1.2.3.5 สีอินดิโกอยด์ (Indigoids) มีโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุลดังนี้



จากการจำแนกโครงสร้างของสีย้อมดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สรุปลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่าง ๆ (สีย้อม, 2544 ข; Hunger, 2003)

ประเภทของสีย้อม	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม
1. สีแอสิด	Azo, Anthraquinone, Triphenylmethane (Azine, Xanthane, Nitro, Nitroso, Quinoline)
2. สีเบสิก	Azo, Anthraquinone, Triphenylmethane, Methine, Thiazine, Oxazine, Acridine, Quinoline
3. สีไดเรกต์	Azo, (Stilbene, Thiazole, Oxazine)
4. สีรีแอคทีฟ	Azo, Anthraquinone
5. สีดิสเพส	Azo, Anthraquinone, Nitro
6. สีแวท	Anthraquinone, Indigoid
7. สีซัลเฟอร์	(Sulphur-Containing)
8. สีมอร์แดนต์	Azo, Anthraquinone, Nitroso
9. สีอะโซอิก	Azo
10. สีออกซิเดชัน	Indeterminate Structures
11. สีอินเกรน	Phthalocyanine

สำหรับน้ำเสียสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาทดลองนี้ เป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีที่ทำการผลิตสี 3 กลุ่มหลัก ๆ คือ สีแอสิด สีไดเรกต์ และสีรีแอคทีฟ โดยมุ่งเน้นผลิตสีกลุ่มแอสิดเป็นส่วนใหญ่คือ มีการผลิตมากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ของสีที่ผลิตทั้งหมด (รุ่งโรจน์ วงศ์อนุรักษ์ชัย, 2545)

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับโครงสร้างของโมเลกุล

การมองเห็นสีของมนุษย์นั้นเกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าตา ซึ่งวัตถุมีสีจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่งไว้ และสะท้อนแสงที่เป็นคลื่นแสงเดิมเดิมของคลื่นแสงนั้น เช่น วัตถุที่ดูดกลืนแสงสีน้ำเงินจะสะท้อนคลื่นแสงสีเหลืองทำให้เห็นวัตถุเป็นสีเหลือง ซึ่งสีที่มนุษย์มองเห็นได้จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ดังแสดงใน ตารางที่ 2-2 สำหรับสีขาวยที่มนุษย์มองเห็น คือ สีขาวที่ได้มาจากการสะท้อนแสงในทุกช่วงความยาวคลื่น และ

สีดำได้มาจากการที่วัตถุดูดซับแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่มองเห็นไว้ทั้งหมด (สีย้อม, 2544 ข; Colour chemistry, 2003)

ตารางที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่มองเห็นและคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุ
(Color chemistry, 2003)

คลื่นแสงที่ถูกดูดกลืน		สีที่ตามองเห็น
ความยาวคลื่น(นาโนเมตร)	สี	
400-435	ม่วง	เหลืองอมเขียว
435-480	น้ำเงิน	เหลือง
480-490	น้ำเงินอมเขียว	ส้ม
490-500	เขียวอมน้ำเงิน	แดง
500-560	เขียว	ม่วงแดง
560-580	เขียวอมเหลือง	ม่วง
580-595	เหลือง	น้ำเงิน
595-605	ส้ม	น้ำเงินอมเขียว
605-750	แดง	เขียวอมน้ำเงิน

การที่โมเลกุลของสารชนิดใดจะดูดกลืนแสงในช่วงใดนั้น ขึ้นอยู่กับรายละเอียดโครงสร้างของอิเล็กตรอนในแต่ละโมเลกุลนั้น ดังนั้นโครงสร้างของโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น และทำให้เกิดสีนี้เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophores) โครงสร้างดังกล่าวอาจมีหลายลักษณะแต่แบบที่พบมากที่สุดโมเลกุลของสีย้อม คือ ลักษณะโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะคู่ (Double Bond) และพันธะเดี่ยว (Single Bond) สลับกัน (สีย้อม, 2544 ข) ซึ่งเรียกว่าเรซิแนนท์ หมู่โครโมฟอร์ที่สำคัญมีดังนี้ คือ หมู่อะไซ (-N=N) หมู่คาร์บอนิล (C=O) หมู่มีเทน (-CH=) และหมู่ไนโตร (NO_2) (Christie, 2001) อย่างไรก็ตาม สารที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นโครโมฟอร์เพียงอย่างเดียวซึ่งเรียกว่า โครมาเจน (Chromagen) มักจะให้เพียงสีอ่อน ๆ เท่านั้น ถ้าจะให้สีที่เข้มข้นจำเป็นต้องมีสารเคมีกลุ่มอื่นมาช่วย สารเคมีที่ช่วยทำให้สีของโมเลกุลเข้มข้นนี้เรียกว่าออกโซโครม (Auxochromes) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ หมู่ที่ให้อิเล็กตรอน

(Electron Donors) เช่น กลุ่ม $-NH_2$ และ $-OH$ เป็นต้น และหมู่ที่รับอิเล็กตรอน (Electron Acceptors) เช่น หมู่ $-NO_2$ และ $-CN$ เป็นต้น (สีย้อม, 2544 ข)

2. กระบวนการผลิตสีย้อมอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตสีย้อมอุตสาหกรรม มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.1 การผสม (Premixing) เป็นการนำผงสีและส่วนประกอบที่เป็นของเหลวซึ่งเป็นสารช่วยย้อม เช่น สารยึด ตัวทำละลาย หรือตัวกลางบางส่วนผสมเข้าด้วยกัน ตัวอย่างของสารช่วยย้อมที่มีผลในสีดีสเฟสและสีรีแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 2-3

2.2 การบด (Grinding) เป็นการทำให้อนุภาคของผงสีมีขนาดเล็กลงตามต้องการซึ่งจะเป็นผลให้ผงสีเปียกและกระจายตัวได้ดี ในขั้นตอนนี้อาจมีการเติมส่วนประกอบที่เป็นของเหลวที่เหลือลงไปอีกหรือไม่ก็ได้

2.3 การปรับความข้นเหลว (Adjustment of Consistency) โดยการเติมสารยึด สารเติมแต่ง และตัวทำละลายที่เหลือลงไป

2.4 การเทียบสีของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตรงตามมาตรฐาน

2.5 การควบคุมคุณภาพ (Quality Control) ให้มีสมบัติต่าง ๆ ตรงตามมาตรฐานที่ได้ระบุไว้

2.6 การบรรจุ (Filling) ในภาชนะหรือกระป๋องที่มีขนาดต่าง ๆ (อรอุษา สรวารี, 2544)

ตารางที่ 2-3 สารช่วยย้อมที่มีผลในสีดีสเฟสและสีรีแอกทีฟ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2542)

สารช่วยย้อม	ชื่อทางเคมี
สารช่วยการกระจายตัว/สารลดแรงตึงผิว	ลิกนิน (Lignin) ซัลโฟเนต (Sulphonate) แนฟธาลีนซัลโฟเนต (Naphthalene Suiphonate) โคโพลิเมอร์ของเอทิลีนออกไซด์/โพรพิลีนออกไซด์ (Copolymer of Ethylene Oxide / Propylene Oxide)
เกลือ	เกลือโซเดียมซัลเฟต เกลือโซเดียมคลอไรด์
สารยัดเกาะฝุ่นละอองสี	น้ำมันแร่ หรือพาราฟิน (รวมกับสารอื่น ๆ)
สารป้องกันการแข็งตัว (สำหรับเม็องหนาว)	กลีเซอริน ไกลคอล
สารข้น	ซีเอ็มซี (Carboxyl Methyl Cellulose) โพลีอะไคเลท
ระบบบัพเฟอร์	ฟอสเฟต อะซิเตด

3. ความเป็นพิษของสีย้อมอุตสาหกรรม

ความเป็นพิษของสาร หมายถึง อันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เมื่อต้องสัมผัสกับสารนั้นซึ่งโดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่ได้มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศไม่พบว่า ผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์ มีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด (นันทยา ยานูเมศ, 2539) สีย้อมอาจเข้าสู่ผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ โดยทางจมูกด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และโดยการปะปนเข้าไปกับอาหาร ความเป็นพิษของสีย้อมหากรับประทานเข้าไปจะเห็นได้จากค่า LD_{50} ดังแสดงในตารางที่ 2-4

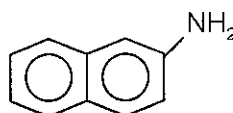
ตารางที่ 2-4 ค่า LD_{50} ของสีย้อมสิ่งทอ (นันทยา ยานูเมศ, 2539)

ค่า LD_{50} (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	จำนวนของสีย้อม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
มากกว่า 5,000	82
2,000-5,000	10
ต่ำกว่า 250	น้อยกว่า 1

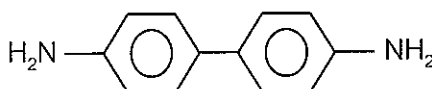
หมายเหตุ โซเดียมไฮยาไนด์ ซึ่งถือว่าเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงมีค่า $LD_{50} = 15$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จากตารางที่ 2-4 พบว่า สีย้อมโดยทั่วไปไม่มีความเป็นพิษต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับเอกสารบางฉบับที่ยืนยันว่า สีย้อมมีความเป็นพิษเมื่อได้รับทางปากค่อนข้างต่ำ และสีย้อมมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ มี LD_{50} (หนู, ทางปาก) มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสีย้อมน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 15 สีย้อม) มี LD_{50} (หนู, ทางปาก) น้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (อังคณา ตูลย์ไตรรัตน์, 2540) ทั้งนี้วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวเป็นสารที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น

2-แนฟธิลเอมีน (2-Naphthylamine)



และ เบนซิไดน์ (Benzidine)



ผลจากการค้นพบดังกล่าวทำให้มีการห้ามผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้วัตถุติดดังกล่าวแล้วในหลายประเทศโดยเฉพาะประเทศในยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งนี้ความไวของร่างกาย (ทั้งทางผิวหนังและการหายใจ) ที่มีต่อความเป็นพิษของสีก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจดังนี้คือ

ความไวด้านผิวหนัง (Skin Sensitisation) หรือโรคผิวหนังภูมิแพ้ที่เกิดจากการสัมผัส (Allergic Contact Dermatitis) คือ การเกิดความล่าช้าต่อการรับรู้และต่อต้านเชื้อของเม็ดเลือดขาว (T-lymphocyte-Mediated Delayed Hypersensitivity) มีรายงานว่า จากกรณีทั้งหมด 28 กรณีที่ผู้ปฏิบัติเป็นโรคผิวหนังในระยะเวลา 18 เดือน มีเพียง 19 กรณีเท่านั้นที่โรคผิวหนังดังกล่าวเกิดจากการสัมผัสกับสีย้อม อย่างไรก็ตามยังมีอีกกรณีหนึ่งคือ โรคผิวหนังที่เกิดจากการสัมผัสของผู้บริโภคบางคนที่เกิดจากสีที่ใช้ย้อมผ้า หรือเรียกว่า "Panty-Hose Syndrome" ซึ่งสีย้อมที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกสีย้อมที่มีโครงสร้างสีย้อมเป็นพวกอะโซและแอนทราควิโนน ซึ่งสีย้อมเหล่านี้จะเข้ากับพวกไนลอนและย้อมเสื้อผ้าบางประเภท (เสื้อชั้นใน กางเกงใน ถุงเท้าและเสื้อสตรี) ซึ่งสัมผัสโดยตรงกับผิวหนังโดยเฉพาะบริเวณที่มีเหงื่อได้ง่ายจึงทำให้เกิดระคายเคืองแพ้ได้ ดังนั้นมาตรการปกป้องที่ดีที่สุดคือ ติดคำเตือนบนฉลากเพื่อให้ผู้ใช้สีย้อมตระหนักถึงอันตรายของสีนั้น ๆ (อังคณา ตุลย์ไทรรัตน์, 2540)

ความไวด้านระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Sensitisation) เป็นสิ่งหนึ่งที่ร่างกายใช้ในการป้องกันความเป็นพิษของสี โดยทั่วไป (แต่ไม่ทุกกรณี) ร่างกายจะสร้าง IgE ซึ่งเป็นสารต่อต้านเชื้อโรคประเภทแอนนาฟิแลคติก (Anaphylactic) ในมนุษย์และหนูซึ่งเฉพาะกับพิษนั้น ๆ ส่งผลให้มีอาการของโรคระบบทางเดินหายใจ มีรายงานหลายฉบับได้กล่าวถึงภูมิแพ้ที่เกิดในระบบทางเดินหายใจเมื่อมีการสัมผัสกับสีเรซินที่ฟ การสัมผัสหรือสูดดมสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้แอนนาฟิแลคติก (Anaphylactic Shock) ซึ่งอาจเกิดอาการชักตามมาจนถึงขั้นโคม่า และอาจทำให้เสียชีวิตได้ในที่สุด (อังคณา ตุลย์ไทรรัตน์, 2540)

ความสามารถในการก่อมะเร็งในสีย้อม ศูนย์วิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) ได้ประเมินความสามารถในการก่อมะเร็งของสีอินทรีย์ (Organic Colorants) 44 ชนิดและสีย้อมที่มีเบนซีนเป็นส่วนประกอบ โดยพบว่าสีย้อม 42 ชนิด (ไม่รวมสีย้อมที่มีเบนซีน) จะเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์มีเพียง 15 ชนิดเท่านั้น ซึ่งสีย้อมอะโซเป็นสีที่รู้กันดีว่าเป็นสีที่สามารถก่อมะเร็งได้ และสีย้อมอะโซประมาณ 150 ชนิดที่สามารถแตกตัวให้อะโรมาติกเอมีนที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ และมีอะโรมาติกเอมีนที่ก่อมะเร็งเพียง 15 ชนิดเท่านั้นที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมสี โดยทั่วไปแล้วสีอะโซจะไม่แตกตัวให้อะโรมาติกเอมีนที่ก่อมะเร็ง แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกอะมิโนซัลโฟนิค

(Aromatic Amino Sulphonic Acid) ซึ่งไม่ก่อหรือมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก

(อังกฤษ ตูลย์ไตรรต์, 2540)

4. มลพิษทางสิ่งแวดล้อมของสีย้อมอุตสาหกรรม

ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งปัจจุบันไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้งเนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม แม้มีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็น จึงทำให้โรงงานมีความจำเป็นต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่าสีนั้นจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม ซึ่งเมื่อทดสอบความเป็นพิษกับปลาพบว่า สีย้อมมีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างค่าความเป็นพิษของสีย้อมต่อปลา (Fish Toxicity) (นันทยา ยานูเมศ, 2539)

LC ₅₀ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนสีย้อมทั้งหมด (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
น้อยกว่า 1	2
1-10	1
10-100	27
100-500	31
มากกว่า 500	38

โดยธรรมชาติของสีซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่านี้มีข้อดีคือ การช่วยลดปริมาณและป้องกันการปล่อยสีสู่สิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าสีนั้นจะมีความเข้มข้นต่ำ หรือเจือจางจนมองไม่เห็นสีในน้ำก็ตาม โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แม่น้ำแล้วสังเกตเห็นได้คือ 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ Tincher ได้ศึกษาปริมาณสีดีสเพิลที่ปล่อยลงในแอ่งของแม่น้ำคูซา (Coosa River Basin) ซึ่งเป็นแหล่งที่มีการย้อมสีพรมมากที่สุดในสหรัฐอเมริกา นอกจากสีดีสเพิลแล้วยังมีการศึกษาปริมาณสีแอสิคบางตัวในแหล่งน้ำดังกล่าวด้วย และมีการศึกษาผลกระทบของสีย้อม 20 ชนิด (5 ชนิดเป็นสีดีสเพิล) ในแอ่งของแม่น้ำยามาสกา (Yamaska River Basin) ซึ่งเป็นแหล่งอุตสาหกรรมย้อมสีทอของประเทศแคนาดา โดยการวัดความเข้มข้นของสี ปริมาณของแข็งแขวนลอยและตะกอนในแม่น้ำ (อังกฤษ ตูลย์ไตรรต์, 2540)

5. กระบวนการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีย้อม

การบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการหนึ่งในการลดมลพิษที่ละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย การเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงคุณสมบัติของน้ำ และองค์ประกอบของมลพิษที่ทิ้งออกจากโรงงาน (นฤมล ศิริทงธรรม, 2539) ในปัจจุบันมีระบบบำบัดน้ำทิ้งมากมายที่ให้อยู่ในอุตสาหกรรมทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น การกรองละเอียด (Ultra Filtration), การดูดซับ (Adsorption), อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis), รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis), การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) และระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นต้น (อังคณา ตูลย์ไธรัตน์, 2541) สำหรับการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมนั้นมักนิยมใช้การบำบัดทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น ๆ การบำบัดจะใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

5.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

5.1.1 รวบรวมน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ มาเก็บไว้ในบ่อพักน้ำเสีย

5.1.2 เติมสารเคมีสำหรับช่วยในการตกตะกอน และปรับพีเอชชุดที่ 1 ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเฟอริกซัลเฟต จากนั้นทำการผสมสารเคมีกับน้ำเสียให้เข้ากันและปล่อยให้ระย้าหนึ่ง

5.1.3 เติมสารเคมีสำหรับตกตะกอน และปรับพีเอชอีกชุดหนึ่ง ได้แก่ เฟอริกคลอไรด์และตัวตกตะกอนแบบโพลิเมอร์ จากนั้นทำการผสมสารเคมีให้เข้ากันและถ่ายน้ำเสียเข้าสู่บ่อตกตะกอนและบ่อแยกตะกอน

5.1.4 แยกตะกอนที่ได้ไปกำจัดต่อ สำหรับน้ำเสียที่ได้จะมีค่าบีโอดี ซีโอดี และปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ผ่านมาตรฐาน แต่ยังมีปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ที่สูง

5.1.5 ทำการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ออกจากน้ำเสีย โดยใช้การตกผลึกโซเดียมคลอไรด์โดยเติมโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการตกผลึกของโซเดียมคลอไรด์ (รุ่งโรจน์ วงศ์อนุรักษัย, 2545)

6. การบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการดูดซับ

6.1 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่างของแข็งกับของแข็ง ก๊าซกับของแข็ง ก๊าซกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง การบำบัดน้ำเสียโดยใช้คาร์บอนจึงเป็นกระบวนการดูดซับระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งกระบวนการดูดซับได้แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption/ Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption/ Chemisorption) (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption/ Physisorption)

เมื่อโมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวเคลื่อนที่มายังผิวหน้าของตัวดูดซับ (Adsorbent) และเกาะติดอยู่โดยโมเลกุลของสารในของเหลวจะเกาะติดกับโมเลกุลของของแข็ง ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งอาจเป็นแบบชนิดที่สามารถแปรสภาพกลับได้ (Regenerable) หรือตัวดูดซับแบบใช้แล้วทิ้ง โดยการนำตัวดูดซับทางกายภาพกลับมาใช้ใหม่จะสมบูรณ์โดยรวม 3 กลไกเข้าด้วยกันคือ อุณหภูมิ ความดัน และความถี่ของการหมุน ซึ่งตามทฤษฎีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนได้ 100 เปอร์เซ็นต์

6.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption/ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมี เป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อโมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวเกาะติดกับผิวหน้าของตัวดูดซับโดยมีการสร้างพันธะเคมี ซึ่งจะมีการปลดปล่อยความร้อนสูงกว่าความร้อนที่ปลดปล่อยจากการดูดซับทางกายภาพ นอกจากนี้การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่บ่อยครั้งมีความยุ่งยากหรือเป็นไปได้ (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

6.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

6.2.1 ลักษณะทางกายภาพ และเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

6.2.2 ลักษณะทางกายภาพ และเคมีของตัวที่ถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดโมเลกุล ความมีขั้ว และส่วนประกอบทางเคมีอื่น ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวทำละลาย

6.2.3 ลักษณะของของเหลว เช่น พีเอช (pH) และอุณหภูมิ

6.2.4 เวลาที่อยู่ในระบบ (Residence Time) (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

6.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

6.3.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นประเภทตัวดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะใช้ในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย กำจัดสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น รสชาติและสิ่งรบกวนอื่น ๆ ถ่านกัมมันต์มีข้อดีคือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สามารถทำให้ตัวทำละลายบริสุทธิ์หรือสามารถนำเอาสารที่มีราคาแพงกลับคืนได้ ส่วนข้อเสียนั้นเนื่องจากถ่าน

กัมมันต์สามารถดูดซับสิ่งสกปรกได้ประมาณ 1/5 ของน้ำหนัก ฉะนั้นการกำจัดมลพิษในน้ำเสียจึงจำเป็นต้องใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณมาก อีกทั้งถ่านกัมมันต์ยังมีราคาแพงเมื่อใช้งานจนเสื่อมสภาพ จะต้องมีการบวนการแปรสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ โดยวิธีการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่นั้นมี 3 วิธี แต่วิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การให้ความร้อน (Thermal Regeneration) กระทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ออกไป อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ Multiple-Hearth Furnace, Fluidized-Hearth Incinerator หรือ Rotary Klin เป็นต้น (Visvanathan, 2004) ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่หลากหลาย เช่น กระดูก (Bone), ถ่านหิน (Coal), เปลือกถั่วลิสง (Nutshell), ถ่านไม้ (Charcoals) เป็นต้น (นฤมล ศิริทรรณ, 2540) พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 450-1,800 ตารางเมตรต่อกรัม มีถ่านกัมมันต์บางชนิดเท่านั้นที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 2,500 ตารางเมตรต่อกรัมดังแสดงในตารางที่ 2-6 ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการ คีชันเป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตมาจากกะลามะพร้าว ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-6 พื้นที่ผิวของวัตถุดิบของถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

วัตถุดิบ	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
ถ่านบิทูมินัส (Bituminous Coal)	1,200-1,400
ถ่านบิทูมินัส	800-1,000
กะลามะพร้าว (Coconut Shell)	1,100-1,150
เศษเยื่อกระดาษ (Pulp Mill Residue)	550-650
เศษเยื่อกระดาษ (Pulp Mill Residue)	1,050-1,100
ไม้ (Wood)	700-1,400

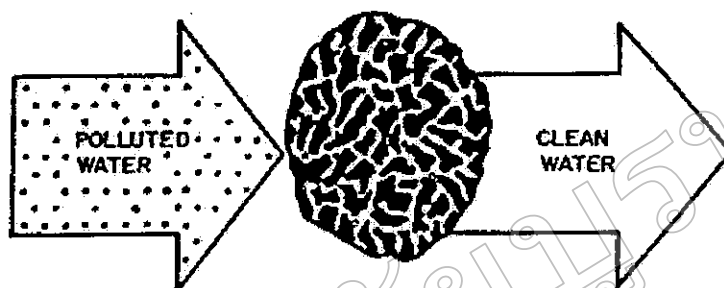
ตารางที่ 2-7 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติทางกายภาพ	ค่าจำเพาะ
การกระจายตัวของขนาดอนุภาค: +8 (2.36)	สูงสุด 5 เปอร์เซ็นต์
(ASTM MESH/ M.M) 8 X 30 (2.36X0.6 มิลลิเมตร)	ต่ำสุด 90 เปอร์เซ็นต์
-30 (0.60 มิลลิเมตร)	สูงสุด 5 เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ต่ำสุด 0.48
เปอร์เซ็นต์ความชื้น (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)	สูงสุด 8
เปอร์เซ็นต์เถ้า (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)	สูงสุด 3.5
ความเป็นกรด-ด่าง	9-11
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ต่ำสุด 1100
ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัม)	ต่ำสุด 1050
เปอร์เซ็นต์การดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)	ต่ำสุด 50
เปอร์เซ็นต์ความกระด้าง	ต่ำสุด 98
เมิลลินบูล (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ต่ำสุด 170

ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากพืช ผิวน้ำจะมีความเป็นต่างและความมีขั้วที่ผิวน้ำชนิดนี้จะส่งผลต่อการดูดซับสีย้อม สี และสารประกอบที่ไม่อิ่มตัว อย่างไรก็ตามส่วนมากผิวน้ำของถ่านกัมมันต์ไม่มีขั้วจะดูดซับพวกสารอินทรีย์ที่แตกตัวยาก และพวกสารอินทรีย์สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายได้ สามารถกำจัดได้อย่างน้อย 85 เปอร์เซ็นต์ ถ่านกัมมันต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ถ่านชนิดเกล็ด (Granular Carbon) และถ่านชนิดผง (Powder Carbon) โดยถ่านชนิดเกล็ดจะมีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงเบอร์ 50 ส่วนถ่านชนิดผงจะมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงเบอร์ 50 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์กับการบำบัดน้ำสามารถทำได้ในรูปแบบผงและแบบเกล็ด เมื่อนำน้ำดื่มหรือน้ำเสียผ่านถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดพบว่า รสชาติ สี และกลิ่นจะถูกกำจัดออกไปจากน้ำ รวมถึงสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ เช่น ฟีนอล, ยาฆ่าแมลง, สีย้อม, สารลดแรงตึงผิวและอื่น ๆ ซึ่งจะถูกกำจัดจากอุตสาหกรรมและน้ำเสียชุมชน (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

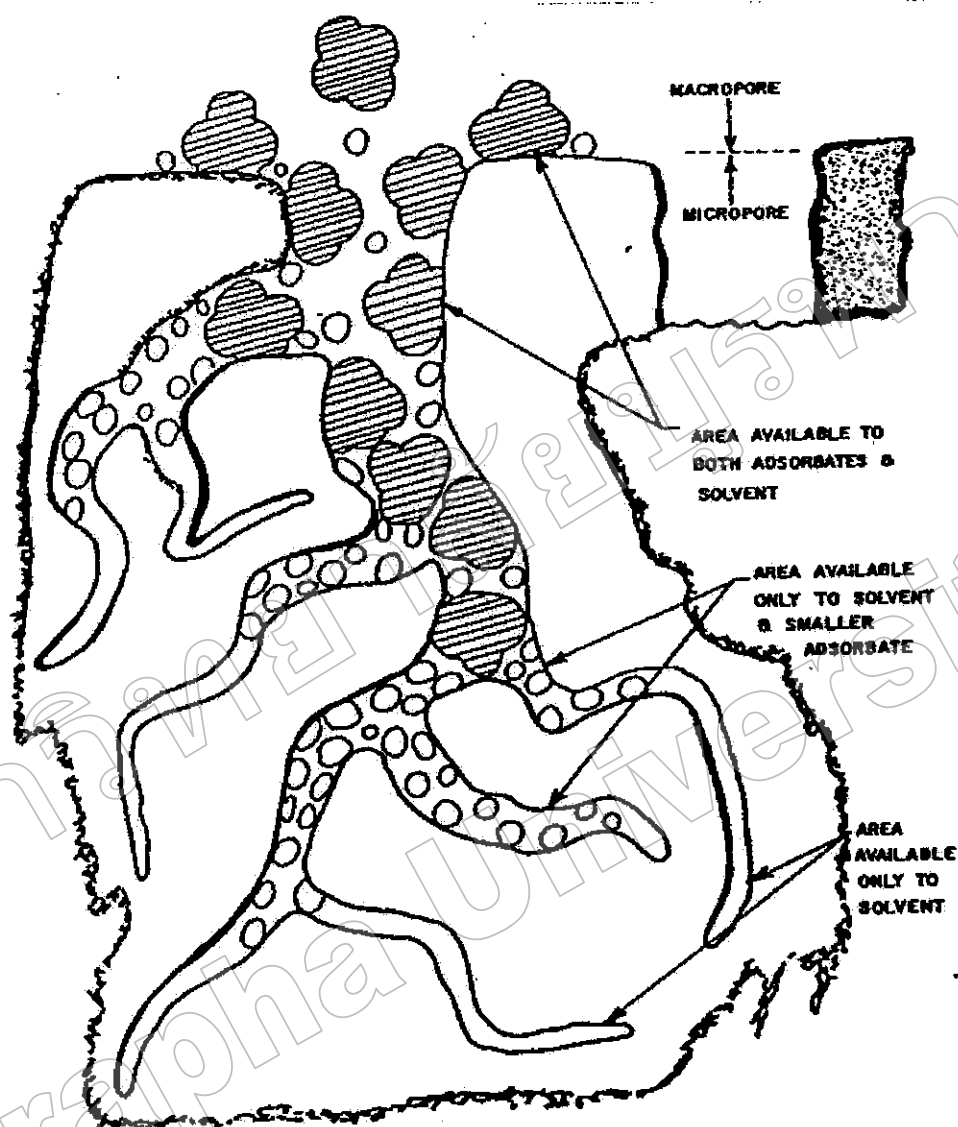
6.3.2 ลักษณะของถ่านกัมมันต์

รูพรุนของถ่านกัมมันต์มีอยู่ทุกที่ของอนุภาค เมื่อน้ำที่มีสารอินทรีย์ปะปนผ่านรูพรุนของถ่าน สารดังกล่าวก็จะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของรูพรุนดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 รูปแบบของการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะส่งผลต่ออัตราส่วนของผิวหน้าและขนาดของรูพรุนใหญ่ (Macropore) ซึ่งจะไม่ทำให้มีจำนวนพื้นที่ผิวของคาร์บอนมากแต่จะเป็นทางผ่านไปยังอนุภาคภายในรูพรุนเล็ก (Micropore) รูพรุนใหญ่จะมีขนาดกว้างมากกว่า 1,000 อังสตรอม ส่วนรูพรุนเล็กมีขนาดกว้างอยู่ในช่วง 10-1,000 อังสตรอม ปัจจัยหลักในการดูดซับ คือ โครงสร้างรูพรุน และพื้นที่ผิว การกระจายตัวของขนาดของรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลที่สามารถเข้าไปอยู่ในอนุภาคคาร์บอนได้ ซึ่งโมเลกุลใหญ่จะถูกกั้นอยู่ที่รูพรุนใหญ่ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

จากภาพที่ 2-11 จะเห็นได้ว่าการใช้คาร์บอนในการบำบัดน้ำเสียจะต้องคำนึงถึงลักษณะของสารปนเปื้อนที่จะกำจัด และการออกแบบชนิดของคาร์บอนให้เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้บำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

6.4 ดิน (Soil)

6.4.1 ส่วนประกอบของดิน ดินประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญคือ

6.4.1.1 อนินทรีย์วัตถุ (Mineral Matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการสลายตัวของแร่ ทางฟิสิกส์ และทางชีวเคมีของแร่และหินต่าง ๆ

6.4.1.2 อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพัง หรือการสลายตัวของซากพืชและสัตว์ทับถมกันอยู่บนดิน

6.4.3.3 น้ำ น้ำที่อยู่ในดินพบว่า อยู่ระหว่างเม็ดดิน (Aggregate) หรืออนุภาคดิน (Particle) ที่เรียกช่องหรือที่ว่างนี้ว่า Pore Space

6.4.3.4 อากาศ เป็นที่ว่างระหว่างดินหรืออนุภาค (ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา, 2546)

6.4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน

6.4.2.1 เนื้อดิน (Soil Texture) จะกล่าวถึงด้านขนาดหรือความหยาบละเอียดของอนุภาคอนินทรีย์ (Inorganic Particle) อนุภาคของดินสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ทราย (Sand) ประกอบด้วย ทรายหยาบ (Coarse Sand) มีขนาดอนุภาค 0.2-2 มิลลิเมตร และ ทรายละเอียด (Fine Sand) มีขนาดอนุภาค 0.02-0.2 มิลลิเมตร ทรายแป้ง (Silt) มีขนาดอนุภาค 0.002-0.02 มิลลิเมตร และดินเหนียว (Clay) มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.002 มิลลิเมตร

6.4.2.2 โครงสร้างดิน (Soil Structure) หมายถึงการจับตัวเป็นเม็ดของอนุภาคเดียวโดยกลไกธรรมชาติ เม็ดดินที่ได้เรียกว่า หน่วยโครงสร้าง (Structure Unit) หรือ Ped ซึ่งมี รูปร่าง และขนาดแตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกโครงสร้างดินโดยอาศัยสมบัติ คือ ประเภท หมายถึง รูปร่างที่ปรากฏของเม็ดดิน ขนาด หมายถึง ขนาดของหน่วยโครงสร้าง และระดับ หมายถึง ความชัดเจนของหน่วยโครงสร้าง เมื่อมองด้วยตาและความแข็งแรงของเม็ดดินเมื่อถูกระทบ

6.4.2.3 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน (Density and Porosity of Soil) ความหนาแน่นและความพรุนเป็นสมบัติของดินที่ได้รับผลกระทบบางส่วนจากชนิดของเนื้อดิน และอีกบางส่วนจากการเกิดเม็ดดิน หรือการเกิดโครงสร้างดิน ความหนาแน่นของดินมี 2 ประเภท คือ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นของอนุภาค (Particle Density) สำหรับดินเดียวกันความหนาแน่นรวมจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นอนุภาคเสมอ ส่วนความพรุนของดินเป็นสมบัติซึ่งถูกควบคุมโดยปริมาตรและขนาดของช่องในดิน ซึ่งจะพบว่าดินเหนียวมีความพรุนรวมสูงกว่าดินทราย (สมศักดิ์ วงใน, 2528; ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา, 2546)

6.4.2.4 สีดิน (Soil Color) สีของดินเป็นสมบัติทางกายภาพที่มองเห็นได้ง่ายตาม ปกติอนุภาคแร่ในดินมักไม่มีสีหรือมีสีจาง (ยกเว้นแร่สีเข้มบางชนิด) ดังนั้นสีดินมักแปรผันไปตามสภาพและองค์ประกอบอื่น ๆ ของดิน เช่น ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ และออกไซด์ของเหล็กดังนี้

6.4.2.4.1 ดินสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ เกิดจากอิทธิพลของปริมาณอินทรีย์วัตถุ และสีของแร่ต้นกำเนิดที่มีสีเข้ม

6.4.2.4.2 ดินสีเทาหรือสีเทาอ่อน เกิดจากการที่ดินเป็นดินเนื้อหยาบประเภทดินทราย มีกระบวนการชะล้างเกิดขึ้นอย่างมากและต่อเนื่อง หรือเกิดจากการสะสมของปูนหรือยิปซัม หรือเกลือชนิดต่าง ๆ ถ้าในกระบวนการกำเนิดดินทำให้มีการสะสมของแคลเซียม หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนตมาก ดินก็จะมีสีเทา

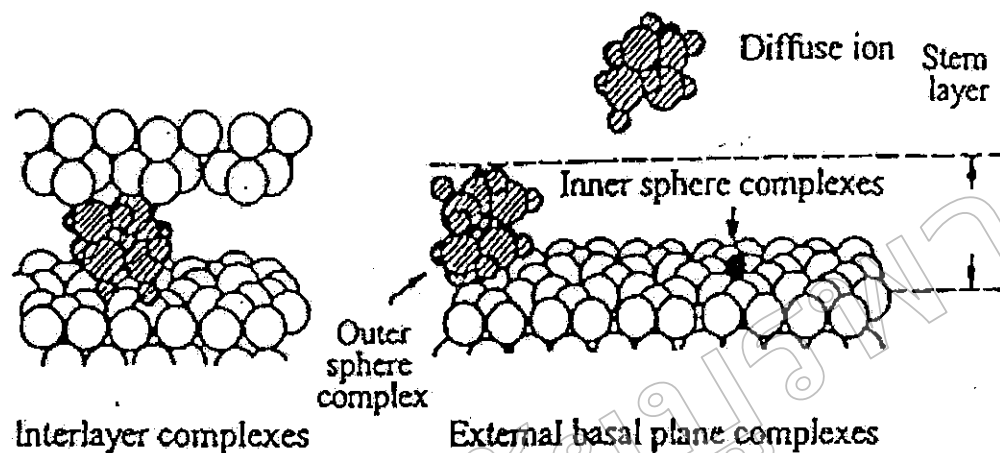
6.4.2.4.3 ดินสีเหลืองหรือสีแดง เป็นดินที่มีออกไซด์ของเหล็กเคลือบผิวอนุภาคมาก ถ้าดินมีสีแดงแสดงว่า ดินมีการระบายน้ำในหน้าตัดดีอยู่เสมอ ถ้าดินมีสีเหลืองแสดงว่าการระบายน้ำของดินไม่ดีเท่าที่ควร

6.4.2.4.4 ดินสีเทาปนน้ำเงิน เนื่องจากสีน้ำเงินหรือสีเทาเป็นสีของสารประกอบเหล็กที่ขาดออกซิเจน ดังนั้นดินที่มีสีเทาปนน้ำเงินมักเป็นดินที่อยู่ใต้สภาวะน้ำขัง

6.4.2.4.5 ดินสีประ เป็นดินที่มีหลายสีผสมกัน โดยทั่วไปมักปรากฏเป็นจุดประสีเหลือง หรือสีแดงบนวัตถุพื้นสีเทา ดินที่มีสีประจะเป็นดินซึ่งมีน้ำขังและแห้งสลับกันไป เช่น ดินนา เป็นต้น (ไพบูลย์ วิวัฒนวงศ์วนา, 2546)

6.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

คุณสมบัติทางเคมีของดินในที่นี้จะกล่าวถึง การดูดซับไอออนของอนุภาคดินโดยอนุภาคของแข็งทั้งที่เป็นอนินทรีย์และอินทรีย์วัตถุในดิน สามารถมีประจุไฟฟ้าได้ในตัวเอง ดังนั้นอนุภาคดินจึงสามารถดูดยึดหรือดูดซับไอออนต่าง ๆ ที่มีประจุตรงกันข้ามไว้บนพื้นผิวได้ ตำแหน่งสำคัญที่ดูดซับ ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันนัล -OH ทำให้เกิดลักษณะของไอออนเชิงซ้อนที่ผิวอนุภาค โดยสามารถแบ่งวิธีการดูดซับได้เป็น 3 แบบคือ ไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นใน (Inner-Sphere Surface Complex) ไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นนอก (Outer-Sphere Surface Complex) และไอออนที่แพร่กระจาย (Diffuse Ion) (ไพบูลย์ วิวัฒนวงศ์วนา, 2546) ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การดูดซับไอออนบนผิวของแร่ฟิสิกส์เกิดประเภท 2:1 (ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา, 2546)

ในส่วนของ การดูดซับไอออนของอินทรีย์วัตถุในดินนั้นพบว่าสูงมาก โดยทั่วไปการดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดินจะสูงกว่าคอลลอยด์อื่น ๆ ตั้งแต่ 2-30 เท่า ในดินโดยทั่วไปปริมาณแคตไอออนที่ถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดินจะอยู่ในช่วงประมาณ 30-90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณที่ดินดูดซับไว้ได้ทั้งหมด ความสามารถในการดูดซับนี้มาจากประจุลบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากของอินทรีย์วัตถุ ซึ่งส่วนใหญ่ก็เกิดจากการแตกออกของสารประกอบบางกลุ่มโดยเฉพาะอย่างยิ่งหมู่คาร์บอกซิลิก และฟีนอลิก

นอกจากความสามารถในการดูดซับไอออนแล้ว โมเลกุลของอินทรีย์วัตถุในดินยังมีประจุบวกอยู่บางส่วน ทำให้มีการดูดซับแอนไอออนได้ด้วย ส่วนที่เป็นประจุบวกดังกล่าวมักเกิดขึ้นจากกระบวนการเติมโปรตอน (Protonation) ของหมู่เอมีน (Amine Group) บนอนุภาคอินทรีย์วัตถุ ความสามารถในการดูดซับแคตไอออนหรือแอนไอออนของอินทรีย์วัตถุในดินมีความสำคัญมากในการป้องกันมิให้ธาตุอาหารพืชถูกชะละลายสูญหายไปกับน้ำได้ง่าย (ยงยุทธ โสภสภา, ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชัยสิทธิ์ ทองจุ, 2541)

จากคุณสมบัติของดินดังกล่าวข้างต้นพบว่า ดินเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับจึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้เมื่อใช้ควบคู่กับถ่านกัมมันต์โดยการกำหนดให้น้ำเสียผ่านชั้นดินเป็นชั้นแรกก่อนผ่านไปยังถ่านกัมมันต์ จะช่วยไม่ให้อินทรีย์วัตถุเสื่อมสภาพเร็วซึ่งวิธีนี้เป็นที่ยอมรับการใช้งานของถ่านกัมมันต์วิธีหนึ่ง นอกจากนี้ดินยังเป็นวัสดุที่หาง่ายและราคาถูกอีกด้วย (พัชร คำธิตา, ศรัญญา ลิ้มปานานนท์ และเรณูภา ศรีชัย, 2543)

7. การบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) (สุภัททิ ต นิมรัตน์, 2547)

การบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยสิ่งมีชีวิตพวกจุลินทรีย์ทั้งหลายในการย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกลดน้อยลง มลสารที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหาร และเจริญเติบโตขยายพันธุ์ต่อไป โดยสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำเสียเมื่อถูกเปลี่ยนมาเป็นจุลินทรีย์จะมีน้ำหนักมากกว่าน้ำ และสามารถแยกออกได้ง่ายด้วยการตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบมีดังต่อไปนี้คือ

7.1 สารอาหาร

สารอาหารที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในระบบตะกอนเร่ง คือ คาร์บอน:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100:5:1 โดยปกติสารอาหารเหล่านี้มีอยู่ครบในน้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) แต่อาจจะไม่เพียงพอในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การขาดธาตุอาหารที่สำคัญเหล่านี้จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตไม่ดี ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณสารอาหารให้เหมาะสมตามอัตราส่วนดังกล่าวข้างต้น

7.2 การเติมอากาศ

ในถังเติมอากาศจะต้องมีค่าออกซิเจนละลายไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งนอกจากจะเพื่อให้ออกซิเจนกับจุลินทรีย์ที่เจริญภายใต้สภาวะออกซิเจนแล้ว ยังทำให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารปนเปื้อนในน้ำทิ้งอีกด้วย

7.3 พีเอช

ค่าพีเอชมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ โดยจุลินทรีย์จะเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอช ระหว่าง 6.5-7.5 ถ้าค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง โดยถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ว่าจะเจริญเติบโตได้ดีทำให้สลัดจ์ตกตะกอนไม่ดี ถ้าค่าพีเอชสูงจะทำให้ฟอสฟอรัสตกตะกอน ผลึกแยกออกจากน้ำทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทำให้ระบบทำงานได้ไม่ดีเช่นกัน

7.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงาน การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิลดลงมักจะทำให้ปฏิกิริยาลดลง ในทางตรงกันข้ามในถ้ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มสูงถึง 45 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงที่

อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และจะหยุดทำงานของจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิถึง 50 องศาเซลเซียส

7.5 ความเข้มข้นของสลัดจ์

ในบ่อเติมอากาศควรมีค่า MLSS (Mixed-Liquor Suspended Solids) ประมาณ 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งควรจะปรับให้มีความเหมาะสมต่อการย่อยสลายสารปนเปื้อนแต่ละชนิด เช่น โรงบำบัดน้ำเสียของโรงฟอกย้อมควรอยู่ในช่วง 2,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น (สุบัณฑิต นิมรัตน์, 2547)

จากรายงานการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทั้งในและต่างประเทศพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (AS) เป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถควบคุมให้คุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ แต่ยังพบข้อเสียของระบบตะกอนเร่งคือ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีสีตกค้างอยู่ค่อนข้างมาก (ปิลันธน์ ธรรมมงคล, 2543) ดังนั้นในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพควรมีระบบการกำจัดสีเข้ามาช่วยให้คุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดดีขึ้น และยังช่วยลดภาระของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้อีกด้วย เช่น การใช้กระบวนการดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้อง อาทิ การใช้ถ่านกัมมันต์ และดินในการกำจัดสีในน้ำทิ้งก่อนผ่านเข้าสู่กระบวนการทางชีวภาพ เป็นต้น

ตอนที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมทางกายภาพดังนี้คือ

จากการศึกษาถึงการบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ โดยใช้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองหาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสี และซีไอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีย้อมผ้าประเภทรีเอกทีฟสีแดง และสีน้ำเงิน โดยทำการทดลองให้น้ำเสียผ่านคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และใช้ค่าอัตราน้ำล้นผิวต่าง ๆ กันคือ 1.17, 2.34 และ 4.63 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต ที่ชั้นความลึกของถ่านต่าง ๆ กัน คือ 20, 50 และ 80 เซนติเมตร พบว่า ที่อัตราน้ำล้นผิวต่ำและที่ความสูงของชั้นถ่าน 80 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี ค่าซีไอดี และอายุการใช้งานของชั้นถ่านสูงกว่าที่อัตราน้ำล้นผิวและความสูงอื่น ๆ (วิไลพร วณิชยวโรดม, 2536) ต่อมาได้มีการศึกษาการใช้การตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอนในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยพบว่าที่อัตราน้ำล้นผิว 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อนาที และที่ความสูงของชั้นคาร์บอน 80 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับความสูงของชั้นคาร์บอน 20 และ 80 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพใน

การบำบัดน้ำทิ้งที่ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 60.03-83.31 เปอร์เซ็นต์ ค่าซีไอดีเท่ากับ 68.15-84.91 เปอร์เซ็นต์ ความขุ่นเท่ากับ 44.4-70.3 เปอร์เซ็นต์ และของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 58.34-83.32 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตซึ่งเป็นสารสร้างตะกอนร่วมกับกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอนพบว่า ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 98.73-99.94 เปอร์เซ็นต์ ค่าซีไอดีเท่ากับ 79.99-89.44 เปอร์เซ็นต์ ความขุ่นเท่ากับ 99.16-99.54 เปอร์เซ็นต์ และของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 73.81-82.74 เปอร์เซ็นต์ (ศิริอุมา บำรุงวงศ์, 2541)

จากการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการศึกษาการลดลงของสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษ ซึ่งได้ทำการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัสดุ 3 ชนิดคือ ไม้ยาง กะลามะพร้าว และถ่านลอย พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากยางไม้มีความสามารถในการดูดซับสีได้ดีที่สุด จากนั้นนำมาทำการทดลองต่อในหลอดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 2 เมตร เก็บข้อมูลที่ความลึกชั้นสารดูดซับเท่ากับ 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.5 เมตร ที่มีอัตราการบำบัดเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต จากผลการทดลองพบว่า ที่ความลึกของชั้นสารดูดซับเท่ากับ 1.5 เมตร และอัตราการบำบัดเท่ากับ 0.5 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต มีความสามารถในการดูดซับสีจากน้ำทิ้งโรงงานเยื่อกระดาษได้ดีที่สุด (ต่อพงศ์ กรีธาชาติ, 2544)

ทางด้านโรงงานอุตสาหกรรมสีได้มีการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานโดยใช้ถ่านกัมมันต์เช่นเดียวกัน โดยการนำน้ำเสียที่ผ่านระบบถึงทรายกรองช้าก่อนทำการบำบัดโดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งการกระทำเช่นนี้จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากการใช้ทรายกรองก่อนเป็นการกำจัดตะกอนแขวนลอยขั้นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลงเนื่องจากถูกอุดตันเร็วเกินไป ทำให้ยืดอายุของถ่านกัมมันต์ได้ อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายและยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายอีกด้วย โดยการทดลองหาความเหมาะสมของทราย 4 ขนาดคือ เบอร์ 20 (850 ไมโครเมตร), เบอร์ 14 (1.4 มิลลิเมตร), เบอร์ 10 (2.0 มิลลิเมตร) และเบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) พบว่า ที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ที่ความสูงของชั้น 80 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพในการกรองดีที่สุด แต่เนื่องจากถูกอุดตันเร็วจึงเลือกขนาดทรายเบอร์ 14 ซึ่งเป็นทรายขนาดที่ใช้ในงานก่อสร้างจึงมีอยู่ทั่วไป และเมื่อทำการบำบัดผ่านถ่านกัมมันต์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 73.60-85.20 เปอร์เซ็นต์ ค่าซีไอดีเท่ากับ 72.40-81.00 เปอร์เซ็นต์ ความขุ่นเท่ากับ 82.75-86.78 เปอร์เซ็นต์ และของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 75.93-85.98 เปอร์เซ็นต์ (ปัญญา เศรษฐา, 2543) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมสีที่ผ่านการตกตะกอนด้วยปูนขาวและเฟอร์รัสซัลเฟตแล้วมาบำบัด

โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสูงของชั้นถ่านคือ 20, 50 และ 80 เซนติเมตร ตามลำดับโดยใช้อัตราน้ำ
 ล้นผิว 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, และ 1.2 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า
 ที่ความสูง 80 เซนติเมตร และอัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง จะมี
 ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด โดยสามารถกำจัดได้เท่ากับ 73-96.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าซีไอดีเท่ากับ
 64.2-95.9 เปอร์เซ็นต์ ของแรงแวนลอยเท่ากับ 77.2-88.1 เปอร์เซ็นต์และค่าความขุ่นเท่ากับ
 71.9-96.2 เปอร์เซ็นต์ (สุจินต์ เอี่ยมปี, 2544)

นอกจากการใช้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แล้วจากการศึกษาการกำจัดสี
 มาลาไคน์กรีนด้วยกระบวนการทางกายภาพและชีวภาพ โดยการเปรียบเทียบความสามารถใน
 การดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดทั้งหมด 5 ชนิดได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ดิน เปลือกหอย เปลือกกุ้ง
 และถ่าน ที่มีต่อสีมาลาไคน์กรีนที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ พบว่า ทั้งถ่านกัมมันต์และดินต่างก็
 สามารถกำจัดสีและซีไอดีได้โดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดซีไอดีได้
 เท่ากับ 52.0 ± 9.8 เปอร์เซ็นต์ และดินสามารถกำจัดซีไอดีได้เท่ากับ 66.6 ± 4.2 เปอร์เซ็นต์
 (Nimrat, Sawangchit & Vuthiphandchai, 2004)

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทางชีวภาพเป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลาย
 สีย้อม ส่วนใหญ่ทำการศึกษาในสีย้อมบริสุทธิ์ ดังนี้

ทาตาโกะ และบัมพัส (Tatarko & Bumpus, 1998) ได้ศึกษาการย่อยสลายสีคองโก เรด
 (Congo Red) ของเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* โดยการเติมคองโก เรดในอาหาร
 เหลวที่มีลิกนิน และไม่มีลิกนินเป็นส่วนผสม และในอาหารแข็งที่มีมอลต์เป็นส่วนผสมพบว่า ใน
 อาหารเหลวนั้นเชื้อราสามารถย่อยสลายสีคองโก เรดในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีลิกนินเป็นส่วนผสม
 เท่านั้น และเชื้อรายังสามารถย่อยสลายสีได้อย่างรวดเร็วในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีมอลต์เป็นส่วนผสม
 อยู่ 2 เปอร์เซ็นต์ แต่จะถูกยับยั้งด้วยการเติมไนโตรเจนลงไป จากการทดลองนี้บ่งชี้ว่า ระบบการ
 ย่อยลิกนินของเชื้อรานี้มีความสำคัญในการย่อยสลายสีย้อม และจากการสังเกตพบว่า สีย้อม
 คองโก เรดจะเป็นสารตั้งต้นสำหรับเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส โดยที่เชื้อรา *P. chrysosporium*
 ซึ่งเป็นเชื้อราขาว (White Rot Fungi) สามารถผลิตเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ 2 ชนิดคือ เอนไซม์
 ลิกนินเปอร์ออกซิเดสและเอนไซม์แมงกานีสเปอร์ออกซิเดสในระหว่างกระบวนการเมตาบอลิซึมที่
 2 เพื่อตอบสนองต่อสภาวะขาดแคลนไนโตรเจนและคาร์บอน เอนไซม์ทั้งสองชนิดจะทำหน้าที่เป็น
 ตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายโมเลกุลสี โดยมีวงจรการเกิดปฏิกิริยาดังนี้คือ ไฮโดรเจนเปอร์
 ออกไซด์ที่ผลิตจากเชื้อจุลินทรีย์จะออกซิไดส์เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสไปเป็นสารประกอบ I
 สารประกอบ I นี้จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นสารประกอบ II ก่อนที่จะถูกรีดิวซ์ต่อไปเป็นเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส

ตั้งต้น สีย้อมประเภทอะโซหลายตัวสามารถทำการรีดิวซ์สารประกอบ I ของเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดสไปเป็นสารประกอบ II ซึ่งผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้ตัวสียอะโซเองถูกออกซิไดส์กลายเป็นสารที่ไม่มีสี (นั่นคือการกำจัดสี) จากนั้นสารประกอบ II ของเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส ก็จะถูกรีดิวซ์ต่อโดยเวราทริลแอกซอลไปเป็นเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส เช่น การเจริญเติบโตของเชื้อรา การผลิตเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส การผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวราทริลแอกซอลโดยเชื้อรา (การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอโดยใช้เชื้อรา, 2544) อีกทั้งการกำจัดสีย้อมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระบบโครโมฟอร์ แต่ขึ้นอยู่กับกลุ่มออกโซโครมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งยังไม่ขึ้นกับเครื่องหมายและการกระจายตัวของประจุอีกด้วย (Podgornik et al., 1999) ผลการทดลองนี้มีความน่าสนใจเนื่องจากมีรายงานก่อนหน้านี้พบว่า สีดองโก เรดไม่ใช่สารตั้งต้นสำหรับเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส อีกทั้งยังไม่มีรายงานการย่อยสลายสีย้อมด้วยเชื้อราชนิดนี้ โดยในปี 1990 นักวิจัยชื่อ คริปป (Cripp) พบว่า เชื้อราชนิดนี้สามารถย่อยสลายสียอะโซ 4 ชนิด โดยที่มีสีดองโก เรดรวมอยู่ด้วย ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสียทั้ง 4 ชนิดของเชื้อรา *P. chrysosporium* นั้นแตกต่างกันไปขึ้นกับโครงสร้างสรีระ ปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในตัวกลางนั้น และสภาวะเมตาโบลิซึมของเชื้อรา จากการศึกษพบว่า สีดองโก เรดถูกย่อยสลายช้าที่สุด เพราะมีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และซับซ้อน (การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอโดยใช้เชื้อรา, 2544)

ฮู (Hu, 1998) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสียอะโซ RP₂B โดย *Pseudomonas luteola* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่แยกมาจากสลัดจ์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียสีย้อม สามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารที่มีกลูโคสต่ำ (0.125 เปอร์เซ็นต์) และไม่มีแหล่งไนโตรเจนพบว่า สามารถกำจัดสีได้ 95 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 5 วัน โดยเอนไซม์อะซิติกเตสของ *P. luteola* จะทำปฏิกิริยากับ RP₂B ในปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยที่สีย้อมจะเป็นตัวเหนี่ยวนำโดยปราศจากการให้สารตั้งต้นในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลาย RP₂B คือ กรดออกซานิลิก (Orthanilic Acid) ซึ่งจากผลการย่อยสลายของ *P. luteola* มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่มีสีย้อมอะโซต่อไป

ซานิ และบานเอร์จี (Sani & Banerjee, 1999) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีของสีย้อมไทรฟีนิลมีเทนและน้ำทิ้งสีย้อมของ *Kurthia* sp. โดยการเก็บดินและน้ำจากบริเวณใกล้เคียงกับระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมสี นำมาจำแนกหาชนิดของแบคทีเรียที่สามารถกำจัดสีย้อมในกลุ่มไทรฟีนิลมีเทนได้อย่างรวดเร็ว พบว่า *Kurthia* sp. สามารถกำจัดสีย้อมภายใต้สภาวะแอโรบิกได้อย่างรวดเร็วโดยอัตราการกำจัดสีย้อมในกลุ่มนี้ได้แก่ มาเจนต้า

(Magenta) 92 เปอร์เซ็นต์ คริสตัลไวโอเล็ต (Crystal Violet) 96 เปอร์เซ็นต์ มาลาโคไนน์กรีน (Malachite Green) 96 เปอร์เซ็นต์ พาราโรซานไลน์ (Pararosanoline) 100 เปอร์เซ็นต์ บริลเลียนกรีน (Brilliant Green) และ เอทิลไวโอเล็ต (Ethyl Violet) 8 เปอร์เซ็นต์ ระดับของการกำจัดสีของน้ำทิ้งสังเคราะห์อยู่ที่ 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม (56 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้น *Kurthia* sp. จึงเป็นแบคทีเรียที่เป็นความหวังที่จะกำจัดมลพิษของน้ำทิ้งที่ประกอบด้วยสีย้อมในกลุ่มไตรฟีนิลมีเทน และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

ยูซุ และวิลลาลักหาวัน (Yuzhu & Viraraghavan, 2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งของเชื้อรา *Aspergillus niger* กระทำโดยการนำเซลล์ของเชื้อรา *A. niger* มาทดสอบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิก บลู 9 พบว่า เซลล์ของเชื้อราสามารถดูดซับสีย้อมชนิดนี้ได้เท่ากับ 1.17 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อใช้เซลล์ของ *A. niger* ที่ไม่มีชีวิตซึ่งกระทำได้โดยการใช้หม้อนึ่งความดันไอสมาสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้เท่ากับ 18.54 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบอีกว่า พิเศษของสีย้อมมีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราในการดูดซับ พิเศษที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 4-6

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีและการย่อยสลายสีย้อมกลุ่มอะไซบางชนิดโดยใช้จุลินทรีย์ผสม กระทำโดยคัดแยกจุลินทรีย์จากตะกอนน้ำเสียของบ่อรวมน้ำเสียของโรงงาน จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสีย้อมได้โดยวิธี subcultivation พบว่า กลุ่มของจุลินทรีย์ผสมที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสีย้อมได้ดี ได้แก่ สกุล *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Klebsiella* และ *Proteus* นอกจากนี้กลุ่มของราได้แก่ สกุล *Penicillium*, *Aspergillus* และราอีกบางชนิดที่ไม่ทราบจำแนก จากการศึกษาดังนี้จึงมีผลต่อการบำบัดน้ำเสียหลังจากเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมลงไปพบว่า ปริมาณของหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำเสีย และเมื่อทำการเลี้ยงในสภาวะเขย่า 1 วันและเลี้ยงต่อไม่เขย่าอีก 8 วัน พบว่า ปริมาณซีโอดีจากเดิม 9,024 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 2,290 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณบีโอดี 513 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 115 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณความเข้มข้นของน้ำจากเดิม 70 แพททิเนียมโคบอลต์ ลดลงเหลือ 10 แพททิเนียมโคบอลต์ ปริมาณของแข็งรวมจากเดิม 716.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 352.4 มิลลิกรัมต่อลิตร (รุ่งโรจน์ วงศ์อนุรักษ์ชัย, 2545)

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมโดยระบบตะกอนเร่ง ระบบตกตะกอนทางเคมี และทั้งสองระบบร่วมกันในลำดับก่อนหลังที่แตกต่างกันใน

ระบบตะกอนเร่ง กระทำโดยการให้ออกซิเจน 1 ชั่วโมง เดิมสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เพื่อให้อัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 100:5:1 และปรับค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ของระบบมีค่า 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนระบบตกตะกอนเคมีกระทำโดยการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต 10 เปอร์เซ็นต์ กวนด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และ 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ทั้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 85 นาที จากนั้นนำสารละลายส่วนใสมาวิเคราะห์พารามิเตอร์พบว่า การบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งตามด้วยระบบตกตะกอนทางเคมีมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในช่วง 86.65-97.68 เปอร์เซ็นต์ บีโอดีอยู่ในช่วง 76.15-83.08 เปอร์เซ็นต์ และซีโอดีอยู่ในช่วง 48.17-67.50 เปอร์เซ็นต์ (ชนิษฐา เจริญลาภ และพริยะ แก่นทับทิม, 2546)

จากการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีนโดยตะกอนเร่งในสภาวะต่าง ๆ โดยกระทำการศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ โดยจุลินทรีย์ผสมจากตะกอนเร่งภายใต้สภาวะต่าง ๆ 4 สภาวะคือ สภาวะแอโรบิก สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน, สภาวะดีไนตริฟิเคชัน และสภาวะเมทาโนจีนิก พบว่า ในระยะเวลาการย่อยสลาย 7 วัน จุลินทรีย์ในสภาวะต่าง ๆ สามารถกำจัดสีได้ 19.05 เปอร์เซ็นต์ 55.07 เปอร์เซ็นต์ 35.42 เปอร์เซ็นต์ และ 43.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดที่สามารถย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีนคือ สภาวะแอโรบิก ดีไนตริฟิเคชัน และเมื่อนำส่วนน้ำจากสภาวะดังกล่าว มาทำการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ภายใต้ 3 สภาวะคือ สภาวะแอโรบิก, สภาวะดีไนตริฟิเคชันและสภาวะเมทาโนจีนิกพบว่า ในขั้นตอนที่ 2 สภาวะแอโรบิกสามารถย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีนได้ดีที่สุดคือ สามารถลดปริมาณสีได้ 61.47 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าซีโอดีได้ 65.09 เปอร์เซ็นต์ (รุจิรัตน์ กิจเลิศพรไพโรจน์, 2546)

เบดิลลี, พาฟลอสตาติส และทินเชอร์ (Beydilli, Pavlostathis & Tincher, 1998) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีและความเป็นพิษของสีรีแอกทีฟภายใต้สภาวะเมทาโนจีนิก กระทำได้โดยการเลี้ยงสลัดจ์จากน้ำเสียชุมชนในสภาวะเมทาโนจีนิก จากนั้นนำสีอะโซ 6 ชนิดได้แก่ แบล็ก 5, เรด 2 และ 20 เยลโล 3 15 และ 17 มาทำการทดสอบโดยแบ่งเป็นชุด ๆ เพื่อประเมินความเป็นพิษของสีที่มีต่อจุลินทรีย์ในสภาวะแอนแอโรบิก และศึกษาความสามารถในการย่อยสลายสีเหล่านี้ด้วยพบว่าที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สีย้อมมีผลต่อจุลินทรีย์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และสามารถกำจัดสีได้เท่ากับ 81.3-97.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในการกำจัดสีแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยในแต่ละช่วงจะเติมสีย้อมใหม่ทุกครั้งซึ่งแต่ละสีจะทดสอบแยกกันพบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองสามารถกำจัดสีได้ 77.8-97.1 เปอร์เซ็นต์