

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

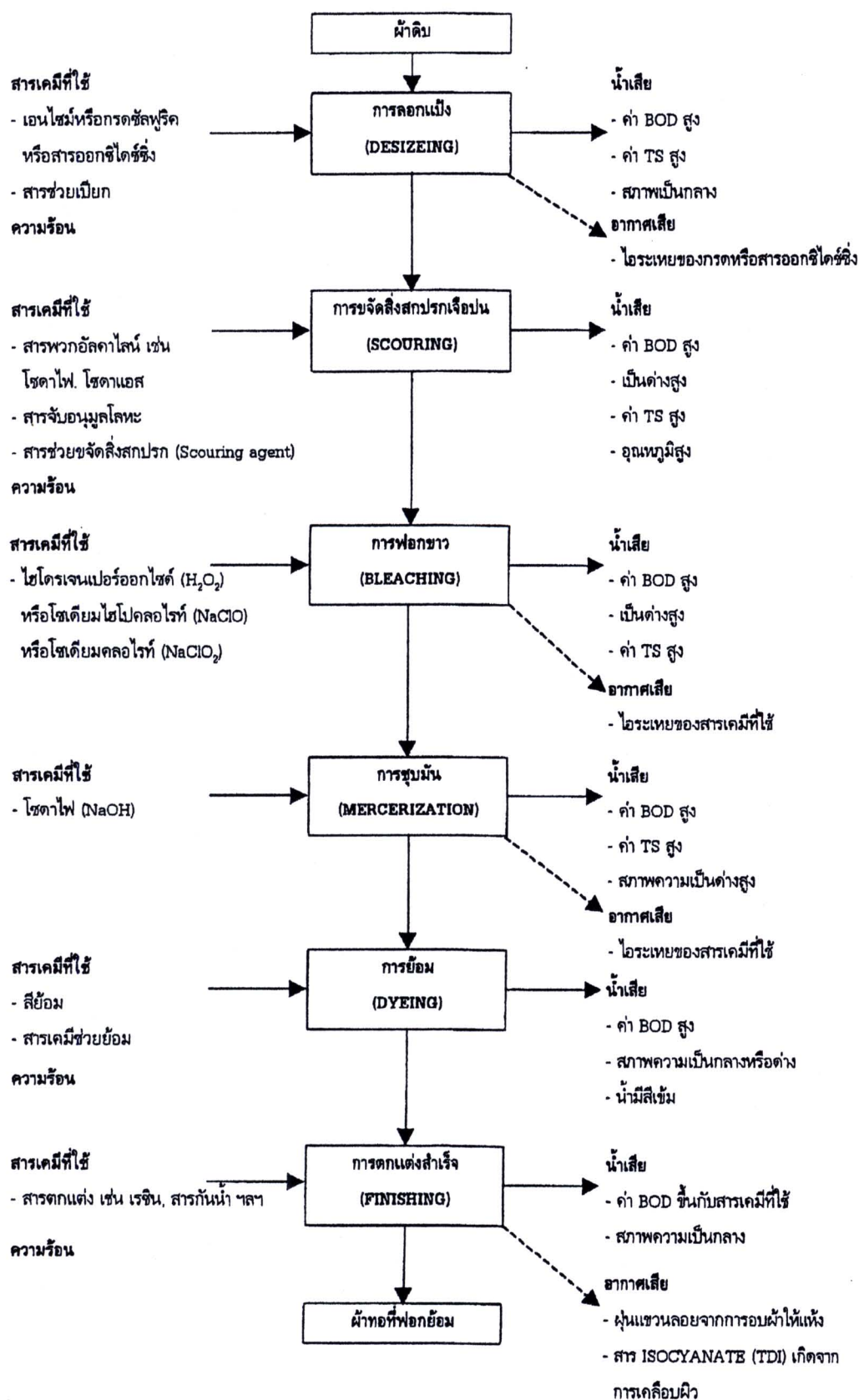
ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากน้ำเสียที่มีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอน ตั้งแต่การเตรียมผ้า การใช้สี และการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่พบได้ในน้ำเสียเสมอ ได้แก่ เศษเส้นใย สารเคมี กรดด่าง ไขมัน สบู่ สีย้อม และตัวทำละลาย ทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูงและเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 แหล่งกำเนิดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สภาพการเกิดและการระบายน้ำเสียจะเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ถ่ายน้ำเสียลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน หลังจากนั้นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานก่อนระบายทิ้งออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกัน คือ

2.2.1 กระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมซึ่งมีปริมาณไม่มากนักแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนที่ค่อนข้างสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อมจะมีปริมาณมากแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนต่ำกว่า ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแตกต่างกันไปในแต่ละขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542)

2.2.2 หม้อไอน้ำ

กระบวนการฟอกย้อมอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรงก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียที่สกปรกที่สุด

2.2.3 การหล่อเย็น

ในกระบวนการฟอกย้อม มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมในเวลาอันสั้น ซึ่งจะได้ทำได้โดยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำทิ้งจากการหล่อเย็นนี้มักมีปริมาณไม่มากนักและมีความสกปรกต่ำ

2.2.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม และในบางกรณีก็เป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

2.2.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ

นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมยังอาจมีน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

2.3 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542)

สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้น มีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ตัวอย่างของสารอนินทรีย์ เช่น ด่างและกรดอินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ($2\text{Na}_2\text{OSiO}_2$) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) แอมโมเนียซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_3) และสารฟอกขาวธรรมชาติ ส่วนสารอินทรีย์นั้นมีการใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งประกอบด้วย กรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก (HCOOH) กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดไขมัน พวกสบู่ แป้ง สารอินทรีย์ที่แทนแป้ง ผงซักฟอก สารที่ทำให้เกิดความอ่อนนุ่ม สีย้อม สารนำพา และสารเคมีอื่นๆ อีก เช่น สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ ซึ่งล้วนแต่นำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อผ้าระหว่างกระบวนการตกแต่งสำเร็จทั้งสิ้น

สารเคมีบางตัวอาจมีค่าบีโอดีสูง ซึ่งในขณะเดียวกันสารเคมีอื่นๆ ที่มีค่าบีโอดีและมีคุณสมบัติคล้ายกันก็สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ จึงนิยมใช้สารเคมีที่มีค่าบีโอดีต่ำ เช่น การใช้ Carboxylmethyl Cellulose แทนแป้ง ซึ่งมีประโยชน์และไม่เป็นอันตราย หรือหาทางขจัดออกไปได้ง่ายโดยวิธีทางเคมีหรือทางฟิสิกส์แต่ทั้งนี้อาจจะมีสารเคมีบางตัวที่ใช้ทดแทนแล้วทำให้เกิดผลต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลเสียหายต่อสัตว์น้ำหรือการใช้น้ำในอนาคต และทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น

เมื่อนำน้ำใช้ไปผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีการใช้สารเคมีหลายชนิดและปริมาณต่างๆ กัน หลังจากนั้นน้ำใช้ผ่านเข้าไปในกระบวนการผลิตแล้วก็จะกลายเป็นน้ำเสียซึ่งจะต้องนำไปปรับปรุงให้มีคุณภาพที่เหมาะสมก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้ คือ

2.3.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาซีน และพาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไนเตรชัน แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) และสารตัวกลางนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ข) ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

1) การเกิดสีของสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้นี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” (Chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ข) คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group) : $-\text{NO}$ (หรือ $=\text{N}-\text{OH}$)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group) : $-\text{NO}_2$ (หรือ $=\text{NO}.\text{OH}$)
- กลุ่มเอโซ (Azo Group) : $-\text{N}=\text{N}-$

- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group) : >C=C
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) : >C=O
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group) : >C=NH และ -CH=N-
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group) : >C=S และ -C-S-S-C-

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มองเห็นสีย่อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

สีย่อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ กลุ่มอะตอมออกซิโครม (Auxochromes) อันได้แก่ OH, NH₂, NHR, NR₂, SO₃ และ COOH เพื่อให้สียอมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกซิโครมโมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า โครมาเจน (Chromagen) โดยทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ออกซิโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสียอมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของโครโมฟอร์ และออกซิโครมของสียอม (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

โครงสร้างทางเคมีของสียอม	หมู่พันธะเคมี	ชื่อพันธะ
Chromophores	-N=N-	Azo
	>C=S	Thio
	-N=O	Nitroso
	$\begin{array}{c} \oplus \\ \text{-N=N-} \\ \\ \text{O} \ominus \end{array}$	Azoxy
	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \nearrow \\ \text{-N} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$	Nitro

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของโครโมฟอร์ และออกโซโครมของสีย้อม (บุษรา ประทุมญาติ, 2545) (ต่อ)

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	หมู่พันธะเคมี	ชื่อพันธะ
Chromophores	-C=N-	Azomethine
	>C=O	Carbonyl
	>C=C<	Ethenyl
Auxochromes	-NH ₂	Amino
	-NHCH ₃	Methylamino
	-NH(CH ₃) ₂	Dimethyl amino
	-SO ₃ H	Sulphonic acid
	-OH	Hydroxy
	-COOH	Carboxylic acid
	-CL	Chloro
	-CH ₃	Methyl
	-OCH ₃	Methoxy
	-CN	Cyano
	-COCH ₃	Acetyl
	-CONH ₂	Amido

2) การจำแนกสีย้อม (อัจฉราพร ไสละสุต, 2527)

การจำแนกสีย้อม สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- (1) จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สามารถแบ่งสีย้อมได้เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่า ปิกเมนต์ (Pigments)
- (2) จำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี จะมีความยุ่งยากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ผ่านการศึกษาด้านเคมีมาโดยตรง นอกจากนี้ สีในกลุ่มเคมีเดียวกันอาจมีวิธีการย้อมแตกต่างกัน ใช้กับเส้นใยแตกต่างกัน อีกประการหนึ่งคือ สูตรโครงสร้างที่แท้จริงของสีย้อมหลายชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบันยังไม่ทราบกันเป็นที่แน่ชัด ทำให้มีข้อจำกัดในการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกสีตามโครงสร้างเคมีของสีได้ดังนี้

2.1) Azo Colorants

1) Aromatic Diazo Compound

- Diazotization and Diazo Compounds
- The Coupling Reaction

2) Azo Compound

- Basic Dyes
- Acid Dyes
- Mordant and Premetallized Dyes
- Direct Dyes

- Azoic Dyes

2.2) Phenylmethane Dyes

2.3) Xantene Dyes

2.4) Indigoid Dyes

2.5) Polycyclicquinone (Anthraquinone, etc.) Dyes

1) Anthraquinone Group – Vat Dyes

- Acylamino Anthraquinones
- Condensation Products of Amino Anthraquinone and Cyanuric Chloride
- Anthraquinone Acridones
- Benzanthrone
- Anthanthrones
- Pyranthone and Flavanthrone
- Anthrimides
- Carbazoles
- Sulfur-Containing Anthraquinone Compounds

2) Naphthalenic Acid Group – Vat Dyes

3) Esters of Anthraquinone – Vat Dyes

4) Anthraquinonoid – Acid Dyes

2.6) Sulfur Fusion Dyes

2.7) Amine Oxidation Colorants

2.8) Phthalocyanine Colorants

2.9) Onium Dyes

2.10) Reactive Dyes

2.11) Pigments

(3) จำแนกตามลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

2.3.2 สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมและการตกแต่ง มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 3 กลุ่มดังนี้

- สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemicals) ได้แก่ สารช่วยจัดสิ่งสกปรก (Scouring Agent) สารช่วยเปียก (Wetting Agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีที่สม่ำเสมอ (Levelling Agent)

- สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

- สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ กันยับ ฯลฯ สารเคมีต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

2.3.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปน โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารชีผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ ในกระบวนการผลิตก็ยังมีการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวงสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยืน เป็นต้น

สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อมและจะหลุดติดมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และแนวทางการบำบัด

ประเภทสีย้อม	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	แนวทางการบำบัด
สีย้อมเอซิด (Acid Dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Brown และ Hamburger, 1987)
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (Metal Complex Acid Dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่น	- ยังไม่มีรายงาน
สีย้อมแวท (Vat Dye)	- เป็น คอลลอยด์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสีกกับปูนขาว สารส้ม และปูนขาว (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ก)
สีย้อมไดเรกต์ (Direct Dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Brown และ Hamburger, 1987) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ก)
สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse Dye)	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- กระบวนการเอสปีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนอนกติก- แอโรบิก/ออกติก (จินตนา แป้นสุวรรณ, 2539) - กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ (Kim และคณะ, 2004)

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และแนวทางการบำบัด (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	แนวทางการบำบัด
สีย้อมอะโซอิก (Azoic Dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสิกกับปูนขาว สารส้ม และปูนขาว (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ก)
สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่นดี	- กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้ไฮโชน (Homing, 1978 อ้างถึงโดย Reife และ Freeman, 1996) - กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสิก (Panswad และ Wongchaisuwan, 1986) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (นวลละออง เนียมละออง, 2525; ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ก; อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539; กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์, 2540) - กระบวนการเอสปีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนอนอกซิก- แอโรบิก/ออกซิก (จินตนา แป้นสุวรรณ, 2539) - กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้สารเคมีเฟนตัน (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540) - กระบวนการไร้อากาศ-เติมอากาศแบบเอสปีอาร์ (วรวิทย์ เหลืองดิลก, 2541) - กระบวนการทางชีวภาพแบบแบทช์โดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ <i>Pseudomonas luteola</i> (Chang และ Lin, 2000) - กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ (Kim และคณะ, 2004)



ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และแนวทางการบำบัด (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	แนวทางการบำบัด
สีย้อมเบสิก (Basic or Cationic Dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี	- กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Horning, 1978 อ้างถึงโดย Reife และ Freeman, 1996)
สีย้อมมอร์แดนท์หรือโครม (Mordant or Chrome)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่นดี	- กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Brown และ Hamburger, 1987)
สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสกับปูนขาว สารส้ม และปูนขาว (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527ก) - กระบวนการเอสปีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนอนอกซิก- แอโรบิก/ออกซิก (จินตนา แป้นสุวรรณ, 2539)

2.3.4 เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

2.3.5 สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกชนิดอื่นๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้าซึ่งมักจะเป็นสารประกอบพวก Chlorinated Benzene พวกสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องเหล่านี้ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสียในภายหลัง



จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อมมีความหลากหลายอย่างยิ่งในแง่ขององค์ประกอบทางเคมี แต่น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ยังมีข้อดีอยู่บ้างตรงที่สารส่วนใหญ่เป็นสารที่ง่ายต่อการบำบัด และมีค่าความเป็นพิษต่ำ

2.4 พันธะเอโซ (Azo Bond)

พันธะเอโซ ($-N=N-$) ทำหน้าที่เป็นโครโมฟอร์ (Chromophores) อาจมีหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่าก็ได้และมีออกซิโครมได้หลายกลุ่ม สารตัวกลางในปฏิกิริยา (Intermediate) มี 2 ชนิด คือ ไดเอโซ และสารร่วมทำปฏิกิริยา (Coupling) ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกรดหรือด่าง ประเภทของสีย้อมที่มีพันธะเอโซเป็นโครโมฟอร์ ได้แก่ (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

2.4.1 Monoazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์เอโซเพียง 1 กลุ่ม และแบ่งออกได้อีกเป็น 8 ชนิด คือ

- 1) Monoazo Direct dyes
- 2) Monoazo Acid dyes
- 3) Monoazo food colours
- 4) Monoazo Mordant dyes
- 5) Monoazo Solvent dyes
- 6) Monoazo Disperse dyes
- 7) Monoazo Cationic dyes
- 8) Monoazo Reactive dyes

2.4.2 Diazo หรือ Biazos dyes มีโครโมฟอร์เอโซ 2 กลุ่ม

2.4.3 Triazo dyes มีโครโมฟอร์เอโซ 3 กลุ่ม

2.4.4 Polyazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์เอโซตั้งแต่ 4 กลุ่มขึ้นไป

2.4.5 Mordant azo dyes คือ กลุ่มเอโซที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทำหน้าที่เป็นมอร์แดนท์หรือตัวช่วยเพิ่มการย้อมเกาะ

2.4.6 Stilbene azo dyes ประกอบด้วยเอโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ซึ่งให้สีเหลืองหรือส้มที่สามารถย้อมได้รวดเร็วและมีการย้อมเกาะที่ดีสำหรับเส้นใยฝ้าย

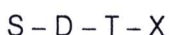
2.4.7 Pyrazolone azo dyes เป็นสีย้อมเอโซที่มีหมู่ไพราซอลในโครงสร้าง

2.5 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes)

สีย้อมรีแอกทีฟเป็นชื่อสีย้อมที่เรียกตามลักษณะการใช้งาน สีย้อมรีแอกทีฟเป็นสีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน (Hu, 1992 อ้างโดยโกมล, 2541) เนื่องจากสีชนิดนี้ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง ขณะย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโคเวเลนต์เพื่อสร้างสารประกอบครอสลิงก์กับเซลลูโลสซึ่งเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้เกิดเป็นสีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

2.5.1 โครงสร้างเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟ

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ



D = Chromophoric Group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี และสร้างการยึดเกาะกับเส้นใยเซลลูโลส

X = Reactive System เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส

T = Bridging Group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive System กับ Chromophore

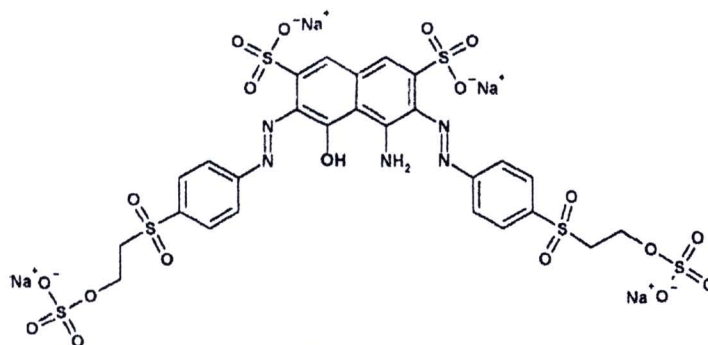
S = Solubilising Group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับโครโมฟอร์ (Chromophoric Group) โดยทั่วไปเป็นพวกรดซัลโฟนิค ($-\text{SO}_2\text{Na}$) อาจมี 1 กลุ่มหรือมากกว่า

ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ

- 1) กลุ่มโครโมฟอร์ (D)
- 2) กลุ่มรีแอกทีฟ (X)

2.5.2 สี Reactive Black 5

สี Reactive Black 5 มีสูตรทางเคมีคือ $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$ มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) เท่ากับ 991.82 โครงสร้างโครโมฟอร์ (D) เป็นโมเลกุลของกลุ่มไดเอโซ ส่วนกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซีของเส้นใยเซลลูโลส (X) คือ Sulphatoethylsulphone โดยมีโครงสร้าง ดังนี้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสี Reactive Black 5 (Forgacs และคณะ, 2004)

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม กล่าวได้ว่า เป็นน้ำเสียที่มีความหลากหลายเป็นอย่างยิ่งในแง่ของส่วนประกอบของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ

2.6.1 กระบวนการฟอกย้อมผลิตภัณฑ์

กระบวนการฟอกย้อมผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

- 1) กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย กระบวนการนี้เริ่มจากการนำเส้นด้ายดิบไปผ่านกระบวนการเตรียมแล้วจึงทำการย้อมสี
- 2) กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการลอกแป้ง การทำความสะอาด การชุบมัน ฟอกขาว แล้วจึงนำมาย้อมสี ก่อนทำการตกแต่งสำเร็จ
- 3) กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก กระบวนการนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการฟอกย้อมผ้าทอ แตกต่างกันที่การฟอกย้อมผ้าถักจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง

สำหรับลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทั้ง 3 ข้างต้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีสภาพเป็นด่าง มีค่าบีโอดี ของแข็งแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด และอุณหภูมิสูง

2.6.2 ชนิดของสารลงแป้งบนผ้าทอ

ชนิดของสารลงแป้งบนผ้าทอมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสีย โดยเฉพาะแป้งที่ใช้กับผ้าฝ้าย ส่วนใหญ่จะเป็นแป้งธรรมชาติซึ่งมีค่าบีโอดีสูง

2.6.3 ชนิดและความสกปรกของเส้นใย

โดยทั่วไป น้ำเสียจากการฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติจะมีความสกปรกมากกว่า เส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมามากกว่า

2.6.4 ชนิดของสีย้อมและกรรมวิธีการย้อม

เส้นใยแต่ละชนิดจะมีสีย้อมให้เลือกใช้ได้หลายประเภท แต่ละประเภทก็มีกรรมวิธีการย้อม และมีความจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการช่วยย้อมที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้ ในการย้อมสีย้อมแต่ละประเภทก็ยังมีกรรมวิธีการย้อมให้เลือกได้หลายวิธี และแต่ละวิธีก็มีการใช้สารเคมีที่แตกต่างกันไปทั้งในแง่ของชนิดและปริมาณด้วย

2.7 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542)

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นดังนี้

1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วสารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งเป็นฝ้าคลุมผิวผ้า และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500-1200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) มีค่าพีเอชและค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมักมีค่าพีเอชประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอชและค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต

3) มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส

- 4) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ
- 5) มีความขุ่นสูง โดยเป็นสีที่ใช้ย้อมผ้า
- 6) มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้วได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี
- 7) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

โดยสำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2542) ได้ทำการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล (แหล่ง)
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สี (หน่วย Pt Co)	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าหรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542

2.8 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้ย้อมมีหลายวิธี เนื่องมาจากสีย้อมที่ใช้กันนั้นมีมากมายหลายชนิด มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน อีกทั้งในการผลิตยังมีการเติมสารช่วยย้อมต่างๆ ลงไปด้วย ดังนั้นในการเลือกวิธีการกำจัดสีจึงขึ้นอยู่กับสีและกระบวนการฟอกย้อมแต่ละประเภท โดยสรุปวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการกำจัดสีได้ดังนี้

2.8.1 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางกายภาพ

1) กระบวนการโคแอกกูเลชัน

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกำจัดสีโดยใช้สารเคมี เช่น ปูนขาว สารส้ม เหลือเฟอริกหรือสารฟอสฟอริกเพื่อเติมลงในน้ำเสียที่มีสีเจือปน เพื่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคจนเกิดเป็นฟล็อกแล้วตามด้วยการตกตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้น ซึ่งสีจะถูกจับรวมอยู่ในฟล็อกด้วยจึงทำให้เกิดการลดสีได้ แต่วิธีนี้ต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการกำจัดสีจึงทำให้เกิดมลพิษทางเคมีขึ้นในปริมาณมากทำให้ต้องเพิ่มวิธีการกำจัดสีอีกขั้นตอนหนึ่งและเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นด้วย และที่สำคัญคือ วิธีนี้ใช้ได้กับสีที่ไม่ละลายน้ำ (Reife และ Freeman, 1996)

สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ (2525) ศึกษาการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันกำจัดสีย้อมประเภทต่างๆ ในน้ำเสียย้อมผ้า โดยเลือกแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮดรตเบสิกกับปูนขาว สารส้ม และ ปูนขาว เป็นสารโคแอกกูแลนท์ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นกับประเภทสีย้อม กล่าวคือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำได้แก่ สีย้อมแวท สีย้อมซัลเฟอร์ สีย้อมอะโซอิก สีย้อมเมทัลลิก จะถูกกำจัดได้ง่าย ในขณะที่สีย้อมที่ละลายน้ำได้สีนั้นกำจัดได้ยากมาก เช่น สีย้อมรีแอคทีฟ ส่วนสีย้อมไดเรกซ์ซึ่งไม่เด่นชัดว่าละลายน้ำหรือไม่นั้นถูกกำจัดได้ที่ปริมาณโคแอกกูแลนท์สูงๆ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันยังขึ้นกับโทนสี และชนิดของสารโคแอกกูแลนท์อีกด้วย

Panswad และ Wongchaisuwan (1986) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮดรตเบสิกเป็นสารสร้างตะกอนในน้ำเสียสีสังเคราะห์ของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า การใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮดรตเบสิกเพียงอย่างเดียวเป็นสารสร้างตะกอนจะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลง แต่เมื่อใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮดรตเบสิกพร้อมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารสร้างตะกอนทำให้

ประสิทธิภาพการลดสีสูงขึ้นตามความเข้มข้นของแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิก คือ เมื่อใช้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิกต่ำกว่า 250 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำมาก แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิก 500 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงถึง 92 เปอร์เซ็นต์

2) กระบวนการดูดติดผิว

การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่ำๆ ซึ่งนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยจะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม (Reife และ Freeman, 1996) นอกจากนี้ยังมีดินเหนียวดูดซึม ซีเมนต์ ดินเหนียวทนไฟ ซิลิกาเจล ไม้ โพลีเมอร์สังเคราะห์ ฯลฯ โดยถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสำหรับสีที่ละลายน้ำได้น้อย ซึ่งได้แก่ สีดิลเพอร์ส สีแวท และสีฟักเมนต์

การใช้ผงถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีพบว่า มีประสิทธิภาพการลดสีได้ดี จากงานวิจัยของ อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539) พบว่า ปริมาณของผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและโทนสีของสีย้อม คือ ถ้าต้องการลดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโทนสีแดงและสีน้ำเงินให้ได้ 95 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์เท่ากับ 800 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และยังพบว่าต้องมีการใช้สารสร้างตะกอนเพื่อช่วยให้ถ่านกัมมันต์ตกตะกอนได้ดีซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง ส่วนงานวิจัยของกมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อมรีแอกทีฟด้วยระบบแพคท์ พบว่า ประสิทธิภาพการลดสีขึ้นอยู่กับปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ คือ เมื่อใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 25 50 100 150 และ 225 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดสีได้ 26 37 50 64 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3) กระบวนการเมมเบรน

เป็นวิธีการกำจัดสีที่มีประสิทธิภาพสูง ส่วนมากจะใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นของสีสูง และน้ำที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธีการนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาสูง

4) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะสมสำหรับสารละลายเจือจาง โดยที่เรซินประจุลบใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุลบ ในขณะที่เรซินประจุบวกใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุบวก เรซินจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนสูงและง่ายต่อการฟื้นฟูสภาพ โดยเรซินที่มีประจุบวกจะใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือโซเดียมคลอไรด์ทำการฟื้นฟูสภาพ เรซินประจุลบจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำการฟื้นฟูสภาพ ซึ่งมีการนำวิธีแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้กำจัดสีในน้ำเสีย โดยที่ประสิทธิภาพในการลดสีแอสิด สีรแอกทีฟ และสีดิสเพอร์สสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีไอดีน้อย

2.8.2 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางเคมี

1) การออกซิเดชัน

เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูง โดยให้สีทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์เพื่อลดสี สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ คลอรีนในรูปของเหลวหรือก๊าซ ไฮโปคลอไรต์ และโอโซน รวมทั้งการใช้สารเคมีเฟนตัน ในการใช้สารเคมีเหล่านี้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเจือปน ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงทั้งในด้านสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ ในการบำรุงรักษาต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากสารเหล่านี้มีความเป็นพิษ

การใช้คลอรีนในการลดสีพบว่ามีความสามารถในการลดสีสูง แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้มีคลอรีนเหลือตกค้างในน้ำเสีย อาจทำให้เกิดสารประกอบไตรฮาโลมีเทนซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม Ghosh และคณะ (1978) อ้างถึงโดย Reife และ Freeman (1996) พบว่า เมื่อใช้คลอรีน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพการลดสีจากโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีคลอรีนตกค้างในน้ำเสียประมาณ 110 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อใช้คลอรีนในปริมาณที่ต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีคลอรีนตกค้างแต่มีประสิทธิภาพการลดสีเหลือ 57 เปอร์เซ็นต์

ต่อมาได้มีการใช้โอโซนซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีน และไม่มีสารตกค้างในน้ำเสีย จากงานวิจัยของ Horning (1978) อ้างถึงโดย Reife และ Freeman (1996) พบว่า การใช้โอโซนปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดสีรแอกทีฟ และสีเบสิกได้ แต่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับสีดิสเพอร์ส ส่วนในการกำจัดสีไโดเรกซ์นั้นมีความไม่แน่นอน

นอกจากนี้ การกำจัดด้วยโอโซนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ได้เพียงเล็กน้อย และต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งระบบ

วุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2540) ได้ทำการศึกษาการใช้สารเคมีเฟนตัน (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ + เหล็ก) ในการกำจัดสีของโรงงานฟอกย้อม พบว่า ประสิทธิภาพการลดสีขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กที่ใช้ คือ ประสิทธิภาพการลดสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่อต้องการประสิทธิภาพการลดสีให้ได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยที่สุดเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ต้องใช้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กเท่ากับ 5:1 สำหรับสีย้อมไทนสีดำ แดง และน้ำตาลอ่อน ส่วนสีย้อมไทนสีม่วงต้องใช้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กเท่ากับ 10:1

2) การรีดักชัน

เป็นการเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสี โดยในปฏิกิริยาจะใช้สีเป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำให้โครงสร้างสีแตกจึงเกิดการลดสี สารเคมีที่ใช้โดยทั่วไป คือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (sodium hydrosulfite) หรือ โซเดียมไดไธโอไนต์ (sodium dithionite) ไทโอยูเรียไดออกไซด์ (thiourea dioxide) หรือ formamidine sulfinic (FAS) acid โซเดียมฟอร์มัลดีไฮด์ดีซัลไฟต์เลต (sodium formaldehydesulfoxylate) และ tin (II) chloride (Reife และ Freeman, 1996)

จากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) พบว่าในสภาวะไร้อากาศสามารถลดสีย้อมชนิดเอโซได้ โดยพบว่าการลดสีเกิดจากการสลายพันธะของกลุ่มอะตอมเอโซด้วยปฏิกิริยารีดักชัน แต่เมื่อเกิดการสลายพันธะของเอโซจะทำให้เกิดสารประกอบพวกอะโรมาติกซึ่งเป็นสารพิษ และสารเหล่านี้สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะเดิมอากาศ จึงมีการนำสารรีดิวซ์ซึ่งมาใช้ในการกระบวนการบำบัดขั้นต้นและตามด้วยการบำบัดน้ำเสียแบบเดิมอากาศ นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการลดสีของสารรีดิวซ์ซึ่งแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชใน น้ำเสีย เช่น ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์จะมีประสิทธิภาพการลดสีดีที่สุด ส่วนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10.7 ไทโอยูเรียไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการลดสีดีที่สุด (Reife และ Freeman, 1996)

3) กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

จากการที่สถาบัน American Textile ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมทำให้ทราบต่อมาว่านอกจากจะสามารถกำจัดโลหะหนักแล้วยังสามารถกำจัดสีให้ลดลงได้อีกด้วย จึงทำให้มีการใช้เทคโนโลยีนี้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นครั้งแรก (Uhrich, 1989 อ้างโดย Reife และ Freeman, 1996) โดยใช้ชื่อว่า Andco Environmental Process ซึ่งนอกจากจะสามารถกำจัดสีและโลหะหนักได้แล้วยังสามารถกำจัดบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้อีกด้วยโดยจะต้องมีขั้นตอนอื่นๆ ประกอบ เช่น ถังน้ำใส ถังกรอง ตลอดจนการกำจัดสิ่งเจือปนที่เป็นพิษออกจากน้ำทิ้ง ทำให้สามารถนำน้ำที่ผ่านขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นกลับไปใช้ในกระบวนการฟอกย้อมได้อีก

Kennedy (1991) แนะนำวิธีการกำจัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งกระบวนการนี้โอออนของเหล็ก 200-500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีได้ 90-98 เปอร์เซ็นต์ โดยโมเลกุลสีย้อมจะถูกกำจัดด้วยกลไกการดูดติดผิวบนเมตริกซ์ของเฟอร์รัสโอออน ด้วยแรงดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิตย์และการถูกล้อมแบบกายภาพ และสีย้อมยังถูกกำจัดด้วยกลไกอื่นๆ เช่น มีพันธะกับโอออนไฮดรอกไซด์ หรือโมเลกุลของสีย้อมเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้น

2.8.3 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางชีวภาพ

1) กระบวนการทางชีวภาพแบบเติมอากาศ

การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบเติมอากาศเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการอื่นแต่ปัญหาที่พบคือการบำบัดสีย้อม เนื่องจากสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาสามารถต้านทานการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน และมีการเติมสารเคมีลงไปในสีย้อมเพื่อให้ทนต่อการออกซิไดซ์โดยสารเคมีและแสง สีบางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ อีกทั้งยังเป็นการยากที่จุลินทรีย์จะสามารถปรับตัวให้ชินกับน้ำเสียได้ เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งจากกระบวนการย้อม สีที่ใช้ย้อม และสารช่วยย้อมต่างๆ

Porter และ Snider (1976) อ้างถึงโดย Dubrow และคณะ (1996) พบว่า เมื่อทดสอบค่าบีโอดี 30 วัน โมเลกุลสีจะถูกย่อยสลายมากกว่าที่ทดสอบที่ค่าบีโอดี 5 วัน โดยการศึกษาใช้กลุ่มจุลินทรีย์ที่ไม่ชินกับน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน ซึ่งสรุปได้ว่าน้ำเสียที่มีสีย้อมต้องการ

ระยะเวลาในการปรับตัวของกลุ่มจุลินทรีย์ฟันทานและย่อยสลายได้ช้าซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Shriver และ Daque (1978) อ้างโดย Reife และ Freeman (1996) ได้กล่าวว่า น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะย่อยสลายได้ช้ากว่าน้ำเสียจากชุมชนโดยทำการทดลองวัดค่าบีโอดีเมื่อเวลาผ่านไป 10 วันพบว่า น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมถูกย่อยสลายไปเพียง 31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำเสียชุมชนถูกย่อยสลายไป 92 เปอร์เซ็นต์

Shaul และคณะ (1986) ได้อธิบายไว้ว่ากลไกแรกที่สำคัญสำหรับการกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบเติมอากาศ คือ การดูดติดผิวสไลด์จ์ ความสามารถในการกำจัดสีขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือ สมบัติ โครงสร้างและโมเลกุลของสี จำนวนและตำแหน่งของกลุ่มย่อย (Substituents) ในโมเลกุลสี ความสามารถในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นหากว่ามีกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ไนโตร (nitro) เอโซ (azo) อยู่ในโมเลกุลสี และการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของโมเลกุลสี แต่ถ้าในโมเลกุลของสีมีกลุ่มซัลโฟ (sulfo) อยู่จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีโดยกระบวนการแยกชีวเวเต็ดสไลด์จ์ลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟล็อก ขนาดพื้นที่ผิวของฟล็อก และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยพบว่าถ้าเพิ่มพื้นที่ผิวและค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น

Marquez และ Costa (1996) ศึกษาการใช้ระบบ PACT (Powder Activated Carbon Treatment) ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก โดยการเติมผงถ่านกัมมันต์ในระบบแยกชีวเวเต็ดสไลด์จ์จำลองในห้องปฏิบัติการ แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพ (biomass) กับการกำจัดสี พบว่า ที่ความเข้มข้นมวลชีวภาพประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการกำจัดสีได้ดีที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพียงพอในการดูดติดสีและให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและเจริญเติบโต แต่เมื่อความเข้มข้นมวลชีวภาพมากกว่า 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร พื้นที่ผิวของผงถ่านมีน้อยลงเนื่องจากมีมวลชีวภาพยึดเกาะมากเกินไปจนขาดพื้นที่ผิวเหลือสำหรับการดูดติดผิวกับสีย้อม

กมลรัตน์ ติประเสริฐวงศ์ (2540) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีในระบบแยกชีวเวเต็ดสไลด์จ์ด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์ พบว่า ประสิทธิภาพการลดสีขึ้นอยู่กับปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ คือ เมื่อใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 25 50 100 150 และ 225 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 26 37 50 64 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยระบบแยกชีวเวเต็ดสไลด์จ์ที่เติมผงถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นจาก 13.5-27

เปอร์เซ็นต์ เป็น 26-68 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเพิ่มขึ้นจาก 67-75 เปอร์เซ็นต์ เป็น 74-84 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผงถ่านกัมมันต์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของสไลด์จ์จากระบบแยกทิวเวเต็ดสไลด์จ์ด้วย

2) กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเจือปนด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ซึ่งในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียที่ใช้สำหรับระบบบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อบำบัดสีย้อม โดยจากผลการศึกษาพบว่าแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีความสามารถย่อยสลายสีย้อมอาหารชนิดเอโซได้ (Carliell และคณะ, 1995) ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาหลักการสลายพันธะเอโซด้วยจุลินทรีย์ประเภทเดียวกับที่อยู่ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

Haug และคณะ (1991) ได้เสนอว่าการย่อยสลายสีย้อมจนสมบูรณ์ได้ควรมีทั้งขั้นตอนไร้อากาศและขั้นตอนเติมอากาศ อีกทั้งจำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์หลายชนิดจึงจะทำให้เกิดการย่อยสลายสีย้อมจนสมบูรณ์

Chung และคณะ (1992) ได้รวบรวมผลการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียหลายชนิดซึ่งเป็นแบคทีเรียในลำไส้ที่ต่างก็สามารถลดสีย้อมเอโซได้ และมักจะพบเอนไซม์ azoreductase ในแบคทีเรียเหล่านี้ และ Chung ยังได้ระบุว่าเอนไซม์ azoreductase นี้ไม่สามารถทนออกซิเจนได้ และต้องการสารประกอบฟลาวิน (flavin) เช่น โคเอนไซม์ FAD เพื่อช่วยในการทำงานของเอนไซม์ นั่นคือ สาร FAD จะถูกรีดิวซ์ด้วยสาร NADH กลายเป็น FADH₂ (reduced flavin nucleotides) และ FADH₂ ก็ถ่ายอิเล็กตรอนให้กับพันธะเอโซของสีย้อม แล้วพันธะเอโซก็แตกออกนั่นเอง ดังนั้นการลดสีในน้ำเสียจึงไม่ใช่การย่อยสลายโดยตัวสีย้อมเป็นสารให้อิเล็กตรอนเช่นสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป แต่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซิงเอเจนต์สำหรับ FADH₂ ในการเปลี่ยนรูปกลับเป็นโคเอนไซม์ FAD ในระบบขนส่งอิเล็กตรอนต่อไป (Gingell และ Waker, 1971 อ้างโดย Carliell และคณะ, 1995)

Carliell และคณะ (1996) ได้เสนอกลไกการรีดิวซ์อิเล็กตรอนของสีย้อมภายใต้สภาวะไร้อากาศ และยังมีการศึกษาการลดสีด้วยแบคทีเรียชนิดต่างๆ มากมาย และส่วนใหญ่แบคทีเรียที่สามารถลดสีได้ก็มักจะมีเอนไซม์ azoreductase ที่เป็นตัวการทำให้พันธะเอโซแตกออกเช่นเดียวกับแบคทีเรียในลำไส้

การศึกษาการลดสีด้วยแบคทีเรียในลำไส้ที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาการลดสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากสีย้อมส่วนใหญ่จะมีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพันธะเอโซ ดังนั้น ถ้ามีการทำลายพันธะเอโซได้กลุ่มโครโมฟอร์ของสีย้อมเหล่านี้ก็จะไม่สามารถแสดงสีได้ต่อไป ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในระยะหลังที่มีการผลิตสีรีแอกทีฟขึ้นมาใช้ ถึงแม้จะเป็นสีที่ยึดติดกับเส้นใยได้เป็นอย่างดีแต่ก็เป็นสีที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงทำให้น้ำเสียที่มีสีย้อมรีแอกทีฟหลงเหลืออยู่ยังบำบัดได้ยาก

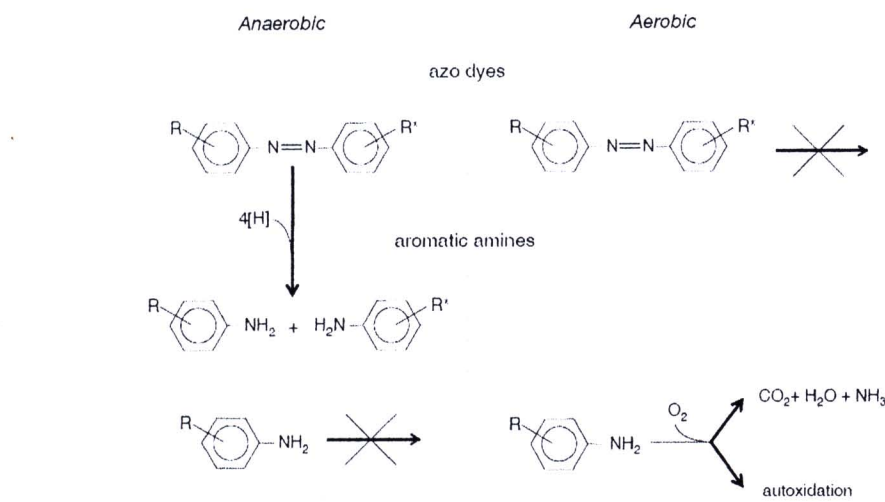
งานวิจัยที่มีคุณประโยชน์อย่างยิ่ง และเป็นเอกสารอ้างอิงของงานวิจัยต่อๆ มาที่เกี่ยวกับการลดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ก็คือ งานวิจัยของ Brown และ Hamburger (1987) ที่ทำการศึกษาสีย้อมอะโซ 14 ชนิด พบว่าสีเกือบทุกชนิดที่ได้นำมาศึกษาซึ่งมีทั้งสีเอซิด สีไดเรกซ์ และสีมอร์แดนท์ ถูกย่อยสลายได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่า สารประกอบที่เกิดจากการย่อยสลายโมเลกุลของสีชนิดเอโซส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดสีที่เกิดขึ้นในช่วงสภาวะไร้อากาศสามารถสรุปได้ดังนี้ (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์, 2543)

- ปริมาณไนเตรตในระบบ พบว่า เมื่อมีไนเตรตในระบบจะทำให้เกิดการยับยั้งการลดสีเนื่องจากไนเตรตมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสีย้อม
- ความเข้มข้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลงเล็กน้อย แต่ปริมาณการลดสีเพิ่มขึ้น
- เวลาพักน้ำในช่วงสภาวะไร้อากาศ เมื่อเวลาพักน้ำนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงขึ้น
- โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม พบว่า การลดสีจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อสีย้อมเป็นโครงสร้างอะโซ

3) กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ

จากการศึกษา พบว่า ในสภาวะไร้อากาศจะสามารถลดสีของมอโนโอไซด์ได้ โดยพบว่าการลดสีเกิดจากการสลายพันธะของกลุ่มอะตอมไนโตรเจน แต่เมื่อเกิดการสลายพันธะจะทำให้เกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารอันตรายและไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะไร้อากาศ แต่จะสามารถย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ



รูปที่ 2.3 การบำบัดสีและกลุ่มอะโรมาติกเอมีนของสภาวะไร้อากาศ-เติมอากาศ (Van der Zee และ Villaverde, 2005)

Zaoyan และคณะ (1992) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยระบบจานหมุนชีวภาพ (RBC) ร่วมกับระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ โดยระบบจานหมุนชีวภาพที่ใช้ประกอบด้วยจานหมุน 3 ชุดต่ออนุกรมกันและเป็นระบบไร้อากาศ โดยจานหมุนจะจมอยู่ใต้ระดับน้ำทั้งหมด และมีชุดจานหมุนแบบจุลชีพใช้อากาศอีก 3 ชุดต่ออนุกรมกันเช่นเดียวกัน และตามด้วยระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยขั้นตอนไร้อากาศเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดสีได้ดีเท่ากับการใช้กระบวนการไร้อากาศร่วมกับขั้นตอนเติมอากาศ Zaoyan กล่าวว่า ขั้นตอนไร้อากาศสามารถลดสีในน้ำเสียลงได้ และยังสามารถย่อยสลายที่ย่อยสลายได้ยากให้กลายเป็นสารที่ย่อยง่ายขึ้น และสามารถถูกออกซิไดซ์ได้สมบูรณ์ด้วยขั้นตอนเติมอากาศต่อไป

Randall (1993) ทำการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียที่มีขั้นตอนไร้อากาศแล้วตามด้วยขั้นตอนเติมอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงเวลากักน้ำในขั้นตอนไร้อากาศเป็น 2 ค่า โดยในช่วงแรกของการทดลองที่เวลากักน้ำ 12 ชั่วโมง และในช่วงหลังเป็น 6 ชั่วโมง ส่วนระบบเติมอากาศมีเวลา

กักน้ำ (HRT) เท่ากับเวลากักตะกอน (SRT) ประมาณ 30 วัน ผลการทดลองปรากฏว่า การลดสีในขั้นตอนไร้อากาศที่การทดลองเวลากักน้ำ 12 ชั่วโมงมีมากกว่าที่ 6 ชั่วโมง และการลดสีส่วนใหญ่ของระบบเกิดขึ้นในขั้นตอนไร้อากาศ คือ ประมาณ 55-60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ขั้นตอนการเติมอากาศลดสีได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการดูดติดผิวในสลัดจ์ ส่วนการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ในขั้นตอนไร้อากาศมีค่อนข้างน้อย แต่จะถูกกำจัดมากในขั้นตอนการเติมอากาศ ดังนั้น Randall จึงเสนอว่า ควรใช้การบำบัดแบบไร้อากาศร่วมกับการบำบัดแบบเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมให้ได้ผลดีที่สุด

จินตนา แป้นสุวรรณ (2539) ศึกษาการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการเอสปีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนออกซิก-แอโรบิก/ออกซิก (A_2O -SBR) โดยมีการเติมแหล่งคาร์บอน 2 ชนิด คือ น้ำตาลและกรดอะซิติก เมื่อศึกษาที่ต่างชนิดกัน คือ สีดิสเพอร์สสีร์แอกทีฟ และสีซัลเฟอร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเรียงจากมากไปน้อย โดยสีดิสเพอร์สและสีซัลเฟอร์มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงในช่วงออกซิก เนื่องจากสีทั้งสองละลายน้ำได้ไม่ดีจึงถูกกำจัดโดยกระบวนการดูดติดผิวของฟล็อกของแบคทีเรีย ส่วนการกำจัดสีร์แอกทีฟจะมีประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงแอนนออกซิก-แอนแอโรบิกสูง อาจเนื่องจากสีร์แอกทีฟมีความสามารถในการละลายน้ำสูงจึงถูกดูดติดที่ผิวฟล็อกได้เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในช่วงแอนนออกซิก-แอนแอโรบิก ที่ระยะเวลายาวนาน จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีร์แอกทีฟสูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอสปีอาร์แบบธรรมดากับแบบแอนนออกซิก-แอโรบิก/ออกซิก (A_2O -SBR) ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบแบบแอนนออกซิก-แอโรบิก/ออกซิก (A_2O -SBR) มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย การกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนรูปที่เคเอ็น และฟอสฟอรัส มีค่าใกล้เคียงกันมาก

วรวิทย์ เหลืองดิลก (2541) ศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟต่อการลดสีโดยกระบวนการไร้อากาศ-เติมอากาศแบบเอสปีอาร์ โดยทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสีร์แอกทีฟโหนดินสีน้ำเงินที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน โดยมีการเติมกลูโคสและกรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้น 20 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การลดลงของสีที่โครงสร้างต่าง ๆ กันจะมีประสิทธิภาพการลดสีแตกต่างกัน คือ โครงสร้างสีเอโซจะถูกลดสีโดยการแตกพันธะเอโซ สีโครงสร้างแอนทราควิโนนจะถูกลดโดยกระบวนการดูดซับบนฟล็อก สีโครงสร้างออกซาซีน ไม่สามารถสรุปกลไกได้เนื่องจากมีสมบัติทางเคมีที่แปลก และความสามารถในการลดสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น

Van der Zee และ Villaverde (2005) อธิบายเกี่ยวกับการกำจัดสีว่ากระบวนการแรก คือ กระบวนการไร้อากาศจะสามารถแตกพันธะสีทำให้สีมีค่าลดลงแต่จะทำให้เกิดกลุ่มสารประกอบอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารอันตรายและไม่สามารถกำจัดได้ในขั้นตอนนี้ แต่กลุ่มสารประกอบอะโรมาติกเอมีนสามารถลดลงได้เมื่ออยู่ในกระบวนการเติมอากาศซึ่งเป็นกระบวนการที่สอง ดังนั้นกระบวนการไร้อากาศ-เติมอากาศจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับบำบัดสีไอโซ

Isik และ Sponza (2008) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์โดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ ที่ค่าเวลาเก็บกัก (HRT) ต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 91-97 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการลดสีอยู่ในช่วง 84-91 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าเวลาเก็บกัก (HRT) ของไร้อากาศและเติมอากาศ คือ 19.17 และ 1.22 วัน ตามลำดับ และยังพบว่าสารประกอบอะโรมาติกเอมีนลดลงเมื่อบำบัดแบบเติมอากาศ

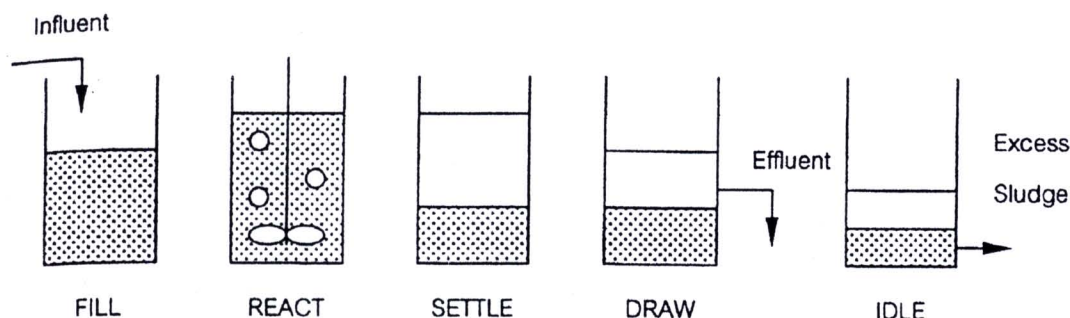
2.9 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR)

ระบบเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถังเติมอากาศ ทำหน้าที่ทั้งการเติมอากาศเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำหน้าที่แยกสลัดจ์ด้วยการตกตะกอนภายในถังเดียวกัน โดยขั้นตอนการทำงานจะปล่อยให้ น้ำเสียไหลเข้าสู่ถังที่มีจุลินทรีย์อยู่ในถังและทำการเติมอากาศ เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจะหยุดเติมอากาศเพื่อทิ้งให้ตกตะกอน ซึ่งจะได้น้ำใสส่วนบนที่สามารถปล่อยทิ้งออกได้เป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัด จากนั้นจะเริ่มกระบวนการใหม่

2.9.1 หลักการทำงานของระบบเอสบีอาร์

ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์จะทำงานเป็นวัฏจักร ซึ่งแต่ละวัฏจักรประกอบด้วย 5 ขั้นตอน (Metcalf และ Eddy, 2004) ดังรูปที่ 2.4 ได้แก่

- 1) ขั้นตอนการรับน้ำเสีย คือ การเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เติมถัง ซึ่งปกติจะมีน้ำและสลัดจ์ค้างอยู่แล้วในขั้นตอนพักระบบอยู่ประมาณ 25% ของปริมาตรถัง ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 25% ของวัฏจักร
- 2) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้จะมีการเติมอากาศและการกวนอย่างสมบูรณ์และใช้เวลาประมาณ 35% ของวัฏจักร
- 3) ขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนนี้จะไม่มีการเติมอากาศและการกวน เพื่อปล่อยให้สลัดจ์จมตัวลง ใช้เวลาประมาณ 20% ของวัฏจักร



รูปที่ 2.4 การทำงานของระบบเอสปีอาร์ (ธนิษฐ์ ปัญญาวิทยุณผล, 2543)

4) ขั้นตอนการระบายน้ำทิ้ง เป็นการปล่อยน้ำใสส่วนบนทิ้ง เหลือน้ำและสลัดจ์ในถังปฏิกิริยาประมาณ 35% ของปริมาตรถัง

5) ขั้นตอนการพักระบบ จะใช้ในการพักระบบในกรณีที่มีการใช้ถังเติมอากาศหลายใบเพื่อรับน้ำเสียได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งต้องมีการเหลื่อมเวลากันในการรองรับน้ำเสียของแต่ละใบ และเมื่อครบรอบการทำงานก็จะเริ่มรับน้ำเสียอีกครั้ง นอกจากนี้อาจมีการระบายสลัดจ์ส่วนเกินทิ้งในขั้นตอนนี้

ในกรณีที่ระบบเอสปีอาร์มีถังเติมอากาศใบเดียวไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการพักระบบ และการระบายสลัดจ์ส่วนเกินทิ้ง อาจทำได้ในปลายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาหรือในช่วงเริ่มต้นของขั้นตอนการตกตะกอน ส่วนความถี่และปริมาณการระบายสลัดจ์ทิ้งขึ้นอยู่กับค่าอายุสลัดจ์

2.9.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสปีอาร์

2.9.2.1 ข้อดีของระบบเอสปีอาร์

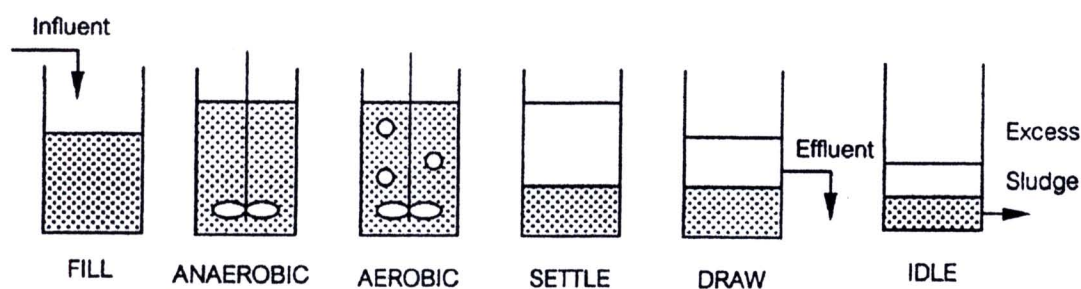
- ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบหมุนเวียนสลัดจ์ ซึ่งจะทำให้ประหยัด และการควบคุมระบบไม่มีความยุ่งยาก
- ป้องกันการเกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย
- จำกัดการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเส้นใย (Filamentous Bacteria) ซึ่งเป็นการป้องกันสลัดจ์ไม่จมตัว
- ระบบสามารถดัดแปลงหรือปรับปรุงเพื่อให้เป็นกระบวนการกำจัดธาตุอาหาร (Biological Nutrient Removal) ได้ง่าย

- ตามทฤษฎี ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบแบบที่ย่อมดีกว่าการไหลต่อเนื่อง สามารถรองรับน้ำเสียในกรณีที่ปริมาณมากหรือมีความเข้มข้นสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ดี
- มีความยืดหยุ่นในการปรับระยะเวลาในแต่ละหน้าที่การทำงานให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของน้ำเสีย

2.9.2.2 ข้อเสียของระบบเอสปีอาร์

- การใช้ระบบเอสปีอาร์เพื่อรับน้ำเสียที่ไหลแบบต่อเนื่อง และมีการไหลแบบแปรผันจะทำให้ยากแก่การควบคุม
- อาจต้องมีถังพักน้ำเสียที่มีขนาดใหญ่เพื่อความสะดวกในการควบคุมระบบ
- มีความยุ่งยากในการออกแบบระบบระบายน้ำทิ้ง ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญเป็นอย่างมากในการออกแบบ มิฉะนั้นอาจทำให้สลัดจ์หลุดออกไปกับน้ำทิ้งได้

อย่างไรก็ตาม สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้มีการนำระบบเอสปีอาร์มาประยุกต์ใช้เป็นระบบเอสปีอาร์แบบไร้อากาศ-เติมอากาศ โดยมีขั้นตอนในการเดินระบบ คือ ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ถังที่มีจุลินทรีย์อยู่ภายในถัง ทำการกวนและเดินระบบในสภาวะไร้อากาศจากนั้นเมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจะทำการเติมอากาศ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการเติมอากาศจะปล่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วนำน้ำใสส่วนบนปล่อยทิ้งออกถือเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัด จากนั้นจะเริ่มกระบวนการใหม่ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ระบบบำบัดเอสปีอาร์แบบไร้อากาศ-เติมอากาศ (ธนิษฐ์ ปัญญาภิญญผล, 2543)

2.10 การควบคุมอายุสลัดจ์

อายุสลัดจ์หรือเวลากักพักของแข็ง (Sludge Retention Time, SRT) หมายถึง ระยะเวลาเฉลี่ยที่จุลชีพหมุนเวียนอยู่ในระบบ เป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบและมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ การควบคุมค่าอายุสลัดจ์ให้มีค่าคงที่จะทำให้อัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพมีค่าคงที่ไปด้วย ซึ่งค่าที่ควบคุมเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของน้ำทิ้ง ในการควบคุมระบบจะต้องทดลองหาค่าอายุสลัดจ์ที่เหมาะสม โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุสลัดจ์กับน้ำทิ้ง เช่น บีโอดี และของแข็งแขวนลอย แล้วเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยค่าอายุสลัดจ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

อายุสลัดจ์ =
$$\frac{\text{น้ำหนักของจุลชีพในถังเติมอากาศ}}{\text{น้ำหนักของจุลชีพที่ออกจากระบบต่อวัน}}$$

สำหรับการหาค่าอายุสลัดจ์ในการเดินระบบแบบแบทช์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_w = V_D + V_{EX}$$
(1)

- โดยที่
- V_w

 $=$

ปริมาตรน้ำที่ทิ้งทั้งหมด (ลิตร)

V_D $=$ ปริมาตรน้ำที่ทิ้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ลิตร)

V_{EX} $=$ ปริมาตรน้ำที่นำออกไปใช้วิเคราะห์ (ลิตร)

$$F_w = \frac{V_w}{t_{EX}}$$
(2)

- โดยที่
- F_w $=$ อัตราการทิ้งน้ำรวม (ลิตร)

t_{EX} $=$ เวลาในการทดลองแต่ละรอบ (วัน)

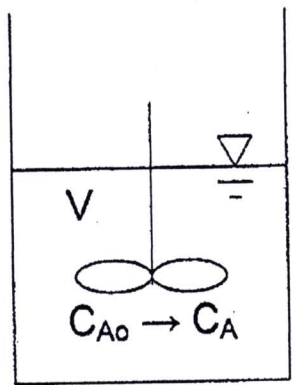
$$\theta_c = \frac{V_R}{F_w} \tag{3}$$

โดยที่ θ_c = อายุตะกอน (วัน)
 V_R = ปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยา (ลิตร)

2.11 แนวทางการนำผลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ในการออกแบบระบบจริง

2.11.1 ระบบแบบแบทช์ (Batch)

การทำงานของระบบแบบแบทช์ คือ การนำสารตั้งต้นทั้งหมดป้อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยาแล้วจึงเริ่มปฏิกิริยา เติปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดถือเป็นการเสร็จสิ้นปฏิกิริยานั้น โดยที่ความเข้มข้นของสารเริ่มต้นจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา



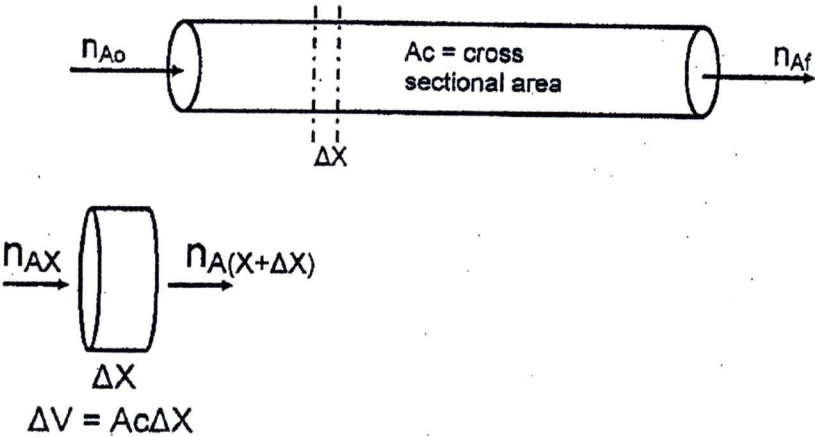
รูปที่ 2.6 ถังปฏิกิริยาระบบแบบแบทช์

สมดุลมวล : $r_A V = \frac{d(M_A)}{dt}$ โดยที่ $M_A = C_A V$

$$r_A V = \frac{d(C_A V)}{dt}$$
$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} \tag{4}$$

2.11.2 ระบบ Plug Flow

ในระบบ Plug Flow ของเหลวหรือของไหลจะไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด ในลักษณะลูกสูบที่ถูกดันออกไป ด้วยความเร็วที่เท่ากันและเวลาเดียวกัน ความเข้มข้นในแนวตั้งฉากกับการไหลเท่ากันตลอด และจะไม่มี การผสมในแนวเดียวกับการไหล เพราะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ตามทฤษฎีการไหลแบบ Plug Flow อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของถังปฏิกิริยาจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ($L/W \geq 10$)



รูปที่ 2.7 ถังปฏิกิริยาแบบ Plug Flow

สมดุลมวล :

$$\begin{aligned} n_{AX} - n_{A(X+\Delta X)} + r_A \cdot Ac \cdot \Delta X &= d(Ac \cdot \Delta X \cdot C_A)/dt \\ -(n_{A(X+\Delta X)} - n_{AX})/\Delta X + r_A \cdot Ac &= Ac \cdot dC_A/dt \\ -dn_A/dX + r_A \cdot Ac &= Ac \cdot dC_A/dt \end{aligned}$$

$n_A = F \cdot C_A$, Steady State $dC_A/dt = 0$:

$$\begin{aligned} -F \cdot dC_A/dX + r_A \cdot Ac &= 0 \\ -r_A &= F/Ac \cdot dC_A/dX \end{aligned} \tag{5}$$

2.11.3 การหาเวลาเก็บกักของระบบแบบแบทช์ (Batch) และระบบ Plug Flow

1) ระบบแบบแบทช์ (Batch)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของระบบแบบแบทช์ คือ การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น

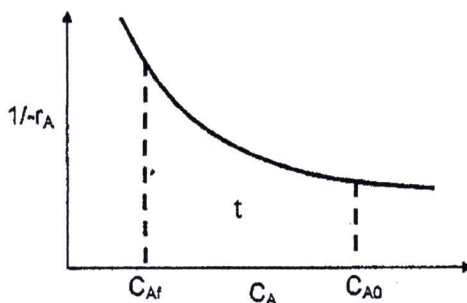
เทียบกับเวลา

จาก $r_A = \frac{dC_A}{dt}$

$$t = \int_{C_{A0}}^{C_{Af}} \frac{dC_A}{r_A} = \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A}$$

$$t = \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A}$$

$$t = \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{1}{-r_A} dC_A$$



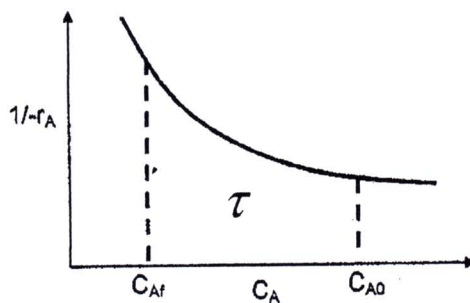
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r_A$ กับ C_A

จากรูปที่ 2.8 สามารถหาเวลาเก็บกักได้จากพื้นที่ใต้กราฟในช่วง $C_{Af} - C_{A0}$ ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r_A$ กับ C_A

2) ระบบ Plug Flow

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของระบบแบบ Plug Flow

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad -r_A &= \frac{F}{A_c} \cdot \frac{dC_A}{dX} \\ dV &= A_c \cdot dX = F \cdot \frac{dC_A}{-r_A} \\ \int_0^V dV &= F \cdot \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A} \\ \tau = \frac{V}{F} &= \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A} \end{aligned}$$



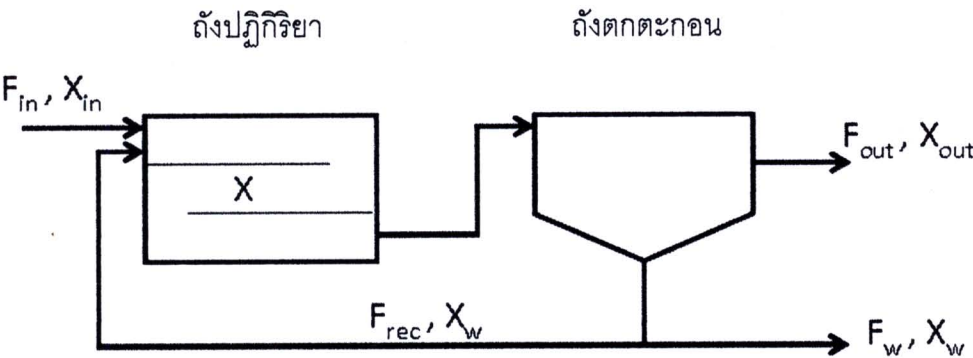
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r_A$ กับ C_A

จากรูปที่ 2.9 สามารถหาเวลาเก็บกักได้จากพื้นที่ใต้กราฟในช่วง $C_{Af} - C_{A0}$ ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/r_A$ กับ C_A

จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาเก็บกักของระบบแบบเบทช์มีค่าเท่ากับระบบแบบ Plug Flow เพราะฉะนั้นในการนำผลที่ได้จากการทดลองนี้ซึ่งเป็นระบบแบบเบทช์ไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นระบบแบบ Plug Flow ได้ ซึ่งจะสามารถทำให้เดินระบบแบบต่อเนื่องได้

2.11.4 การหาอัตราการทิ้งตะกอน

ในการควบคุมอายุตะกอนให้ได้ตามที่ต้องการ ปัจจัยที่สำคัญ คือ อัตราการทิ้งตะกอน ออกจากระบบ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สมดุลมวลของระบบบำบัด

- โดยที่
- F_{in} = อัตราการไหลของน้ำที่เข้าระบบ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 - X_{in} = ความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - F_{out} = อัตราการไหลของน้ำที่ออกจากระบบ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 - X_{out} = ความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - F_w = อัตราการทิ้งตะกอน (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 - X_w = ความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ที่ออกจากถังตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - F_{rec} = อัตราการหมุนเวียนน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 - X = ความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ในถังเติมอากาศ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยการคำนวณเพื่อหาอัตราการทิ้งตะกอนสามารถคำนวณได้จากสมการ (6)

$$\text{จาก } \theta_c = \frac{V \cdot X}{(F_{out} \cdot X_{out}) + (F_w \cdot X_w)}$$

เมื่อ $X_{out} = 0$;
$$\theta_c = \frac{V \cdot X}{F_w \cdot X_w}$$
$$F_w = \frac{V \cdot X}{\theta_c \cdot X_w}$$

(6)

โดยที่ θ_c = ค่าอายุตะกอน (วัน)
 V = ปริมาตรของถัง (ลูกบาศก์เมตร)

2.11.5 การควบคุมอัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ (Food to Microorganism, F/M ratio)

จุลชีพที่มีสมรรถภาพในการทำงานจะต้องมีปริมาณอาหารที่พอเหมาะ ซึ่งควบคุมได้โดยการรักษาอัตราส่วนของน้ำหนักรีดิวต์ที่ส่งเข้ามำบำบัดต่อน้ำหนักจุลชีพ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{F/M ratio} = \frac{\text{อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)} \times \text{รีดิวต์ (มก./ล.)}}{\text{ปริมาตรของถังเติมอากาศ (ลบ.ม.)} \times \text{MLVSS (มก./ล.)}}$$

2.12 งานวิจัยที่ผ่านมา

นวลละออ เนียมสอั้ง (2525) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์และสีพร้อมกันโดยใช้ระบบพีเอซี-แอกทิเวเตดสลัดจ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลการเติมผงถ่านกัมมันต์ในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบเอสปีอาร์ที่อายุสลัดจ์ 10 วัน เวลาพักน้ำ 2 วัน ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟได้ผลดังตารางที่ 2.4 ซึ่งผลจากตารางที่ 2.4 พบว่า ปริมาณผงถ่านที่อยู่ในช่วง 200-300 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นปริมาณที่เหมาะสมโดยสังเกตจากซีไอดี และสีจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้นของผงถ่านมากกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527ก) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมฝ้าย 6 ชนิด ได้แก่ สีย้อมไคเรกท์ สีย้อมแวท สีย้อมรีเอกทีฟ สีย้อมซัลเฟอร์ สีย้อมอะโซอิก และสีย้อมเมททาลิก โดยใช้ผงถ่านกัมมันต์เติมลงในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าผงถ่านกัมมันต์มีความสามารถกำจัดสีในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ค่อนข้างดี

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการกำจัดสีไอดีและสีของน้ำเสียจากการย้อมสีรีเอกทีฟโดยระบบแพคท์

ความเข้มข้น ของผงถ่าน (มก./ล.)	สีไอดี			สี		
	น้ำเสีย (มก./ล.)	น้ำทิ้ง (มก./ล.)	% การกำจัด	น้ำเสีย (ADMI)	น้ำทิ้ง (ADMI)	% การกำจัด
0	543	55	90	1500	1380	8
100	543	51	90	1500	1100	27
200	543	32	94	1500	600	60
300	543	25	95	1500	110	93
350	543	16	97	1500	110	93
400	543	15	97	1500	60	96
500	543	12	98	1500	50	97

หมายเหตุ : สีรีเอกทีฟที่ใช้ประกอบด้วยสีแดง Remazol Red F3 B, เหลือง Remazol Yellow R., น้ำเงิน Remazol Brill RN. ผสมปริมาณอย่างละเท่าๆ กัน

กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์ (2540) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์ พบว่า ประสิทธิภาพการลดสีขึ้นอยู่กับปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ คือ เมื่อใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 25 50 100 150 และ 225 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 26 37 50 64 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่เติมผงถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นจาก 13.5-27 เปอร์เซ็นต์ เป็น 26-68 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีไอดีเพิ่มขึ้นจาก 67-75 เปอร์เซ็นต์ เป็น 74-84 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผงถ่านกัมมันต์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของสลัดจ์จากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ด้วย

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการกำจัดสีและซีไอดีจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้วิจัย	ความเข้มข้นของผงถ่าน (mg/l)	ซีไอดี			สี		
		น้ำเสีย (mg/l)	น้ำทิ้ง (mg/l)	%การกำจัด	น้ำเสีย (ADMI)	น้ำทิ้ง (ADMI)	%การกำจัด
นวลละออง เนียมสออิง (2525)	0-500	543	55-12	90-98	1500	1380-50	8-97
ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527n)							
- สิริแอกทีฟ	0-500	543	55-12	90-98	1500	1380-50	8-97
- สีโดเรกท์	0-400	665	65-25	90-96	1500	1150-280	23-81
- สีแวง	0-300	700	80-55	89-92	670	200-50	70-92
- สีซัลเฟอร์	0-300	1340	70-45	95-96	820	60-50	93-94
- สีอะโซอิก	0-300	1300	100-130	92-90	1760	80-50	99-97
- สีเมทิลลิก	0-300	4550	3600-3400	20-25	2460	450-400	82-84
- สีย้อมรวม	0-350	888	200-80	77-91	1400	1200-200	14-86
กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์ (2540)	0-215	229-280	60-45	74-84	89-122*	66-39*	26-68

หมายเหตุ : * หน่วยเอสยู (SU)

Chang และ Lin (2000) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Pseudomonas luteola* ในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบแบทช์ (Fed-Batch Bioreactor Strategies for Microbial Decolorization of Azo Dye Using a *Pseudomonas luteola* Strain) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Pseudomonas luteola* ที่นำมาใช้ในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบแบทช์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้แบ่งขั้นตอนหลักๆ ออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 เป็นการนำแบคทีเรียสายพันธุ์ *Pseudomonas luteola* มาเลี้ยงในสภาวะที่มีอากาศโดยมีการหมุนใบพัดด้วยความเร็ว 40 รอบต่อนาที (1 vol of air/vol of medium/min) ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส กับ YG medium (ประกอบด้วย กลูโคส 1.25 กรัมต่อลิตรและ Yeast Extract 3 กรัมต่อลิตร) ส่วนขั้นที่ 2 เป็นการทำให้เกิดการกำจัดสีซึ่งจะเริ่มเมื่อ *Pseudomonas luteola* ถูกเลี้ยงจนอยู่ในช่วงแรกๆ ของ Stationary Phase (1 – 1.5 กรัมเซลล์ต่อลิตร) จากนั้นจะเริ่มทำการกำจัดสีโดยปรับอัตราการปั่นป่วน (ความเร็วของใบพัด) ให้อยู่ในช่วง 0 – 200 รอบต่อนาที และอัตราการเติมอากาศอยู่ในช่วง 0 – 0.05 ลิตรต่อนาที โดยในระหว่างการ

เดินระบบนี้จะมีการเติม yeast extract ซึ่งจะเติมในอัตราส่วน yeast extract/dye weight (Y/D) ที่ 1.25 สำหรับผลของการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ในการกำจัดสีให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดด้วยระบบนี้จะต้องทำให้เกิดอัตราความปั่นป่วนต่ำกว่า 100 รอบต่อนาที และไม่ต้องทำให้เกิดการเติมอากาศหรือไม่ให้มีค่าออกซิเจนละลาย อีกทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของสี Reactive Red 22 ต้องมีค่าไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถ้ามากกว่านี้อัตราการกำจัดจะลดลง ส่วนในการศึกษาค่าของ yeast extract พบว่าไม่ได้มีนัยสำคัญมากนัก แต่ค่าที่มีความสำคัญที่สุดคืออัตราภาระบรรทุกสีย่อย สำหรับอัตราการกำจัดสี (V_{dye}) และประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมด (η_{dye}) ที่ดีที่สุดจากการทดลองนี้ คือ 113.7 และ 86.3 มิลลิกรัมของสีย่อยต่อกรัมของเซลล์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าทั้งสองจะเกิดขึ้นเมื่อสีย่อยถูกป้อนเข้าไปอย่างต่อเนื่องในปริมาตรการเลี้ยงเชื้อเริ่มต้น (Initial Culture Volume) 2 ลิตร ที่อัตราภาระบรรทุกสีย่อยคงที่ที่ 200 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และ Y/D ratio 1.25 (อย่างไรก็ตามจะต้องรักษาค่า Y/D ให้สูงกว่า 0.5 ด้วย)

Shaw และคณะ (2001) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยใช้ระบบบำบัดแบบ anaerobic/aerobic sequencing batch (Anaerobic/aerobic treatment of coloured textile effluents using sequencing batch reactors)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วย แป้ง Polyvinyl Alcohol (PVOH) และ Carboxymethyl Cellulose (CMC) ของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยใช้ระบบบำบัดแบบ anaerobic/aerobic sequence redox ซึ่ง 1 รอบการทำงานจะแบ่งเป็น 6 ขั้นตอน คือ การเติม การทำปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ การทำปฏิกิริยาแบบเติมอากาศ การตกตะกอน การระบายน้ำใส และทำให้ถึงว่าง สำหรับในการทดลองนี้จะเตรียมระบบเอสปีอาร์ข้างต้นออกเป็น 2 ชุดโดยน้ำเสียที่เข้าสู่ชุดที่ 1 จะมีสีย่อยปนอยู่ในน้ำเสียตั้งแต่เริ่มแรก ส่วนในชุดที่ 2 น้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าจะยังไม่มีสีปนอยู่ โดยทั้งสองระบบจะมีเวลากักพักน้ำ 2.6 วัน และมีอัตราภาระอินทรีย์ 1.49 และ 1.35 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ทั้งนี้ระบบเอสปีอาร์ทั้ง 2 ชุด จะทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 245 วันโดยในช่วงที่เดินระบบนี้จะทำการควบคุมให้มีการเดินระบบแบบครบทั้ง 6 ขั้นตอน และปรับให้เดินระบบแบบไร้อากาศเท่านั้น อีกทั้งในช่วงตั้งแต่วันที่ 200 เป็นต้นไปจะมีการเติมสีย่อยเข้าสู่ระบบชุดที่ 2 ด้วย ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย่อยเจือปนจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดลดลง และในกรณีของการกำจัดของแข็งแขวนลอยพบว่าสีย่อยเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลง สำหรับความสามารถในการกำจัดสีของระบบนี้ พบว่า มีความสามารถในการ

กำจัดสีคิงที่ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 และจากการศึกษานี้ยังพบว่า ความสามารถในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเดินระบบแบบไร้อากาศและต่อด้วยการเดินระบบแบบเติมอากาศ

Kim และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สและสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (Decolorization of disperse and reactive dye solutions using ferric chloride)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สและสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2.6 ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟค่อนข้างดี และมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สดีมาก

Frijters และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดสีและความเป็นพิษของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำโดยใช้ระบบแบบไร้อากาศควบคู่กับเติมอากาศ (Decolorizing and detoxifying textile wastewater containing both soluble and insoluble dyes, in a full scale combined anaerobic/aerobic system)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ sequential anaerobic/aerobic ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยระบบ sequential anaerobic/aerobic ประกอบด้วยถังปฏิกริยาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่เดินระบบแบบไร้อากาศ ขนาด 70 ลูกบาศก์เมตร และถังเติมอากาศที่มีการติดตั้งแผ่นเอียงขนาด 450 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำที่ส่งเข้าสู่ถังปฏิกริยาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.9 ถึง 7.4 และควบคุมอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่ 35-40 องศาเซลเซียส ส่วนในระบบเติมอากาศจะควบคุมเวลากักน้ำที่ 43 ชั่วโมง และอายุตะกอนที่ 12 วัน โดยมีการเติมอากาศที่ผิวน้ำที่อัตรา 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการวิจัยนี้พบว่าระบบไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 80-95 และระบบเติมอากาศแทบจะไม่มีนัยสำคัญสำหรับการกำจัดสี แต่เป็นที่น่าสนใจว่าสีประเภทสีย้อมแวท แอนทราควิโนน และอินดิโกจะถูกกำจัดโดยระบบเติมอากาศเป็นหลัก ทั้งนี้การทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าระบบ sequential anaerobic/aerobic สามารถกำจัดสีย้อมได้ทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ระบบ sequential anaerobic/aerobic ยังสามารถกำจัดความเป็นพิษได้อย่างสมบูรณ์ด้วยเมื่อวัดความเป็นพิษตามวิธี Microtox™ ซึ่งในการทดลองนี้เมื่อวัดค่าความเป็นพิษของน้ำที่ออกจากระบบไร้อากาศพบว่ายังมีความเป็นพิษสูง แต่เมื่อวัดค่าความเป็นพิษของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ผ่านทั้งระบบไร้อากาศและเติมอากาศจะไม่พบความเป็นพิษ อย่างไรก็ตาม เมื่อทดลอง

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ที่ใช้ในการกำจัดสีและซีไอดี

ผู้วิจัย	ความเข้มข้นของ เฟอริกคลอไรด์ (mM)	TCOD			SCOD			สี		
		น้ำเสีย (mg/l)	น้ำทิ้ง (mg/l)	%การ กำจัด	น้ำเสีย (mg/l)	น้ำทิ้ง (mg/l)	%การ กำจัด	น้ำเสีย (ADMI)	น้ำทิ้ง (ADMI)	%การ กำจัด
Kim และคณะ (2004)										
- Disperse dye										
- D.B. 106	0.93	685	121	82.3	542	114	79.0	500	11.14	97.7
- D.Y. 54	0.74	864	104	88.0	443	90	79.7	500	2.21	99.6
- Reactive dye										
- R.B. 49	2.78	336	274	26.5	333	229	31.2	500	195.57	60.9
- R.Y. 84	1.85	245	82	66.5	237	77	67.5	500	143.56	71.3

โดยให้น้ำผ่านการบำบัดโดยระบบเติมอากาศเพียงอย่างเดียวก็พบว่ายังมีความเป็นพิษอยู่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการกำจัดความเป็นพิษจะต้องมีการบำบัดทั้งแบบไร้อากาศและเติมอากาศจึงจะสามารถกำจัดความเป็นพิษได้

Seesuriyachan และคณะ (2007) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเอโซโดยใช้ *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 และปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสี (Metabolism of azo dyes by *Lactobacillus casei* TISTR 1500 and effects of various factors on decolorization)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมประเภทเอโซ (Methyl Orange) ด้วย *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 โดยนำเชื้อจุลินทรีย์มาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานนมและโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 จะเจริญเติบโตได้ดีภายใต้สภาวะ Microaerophilic ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และในการกำจัดสีนั้น *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 จะเปลี่ยน sulfonated azo dye (Methyl Orange) เป็นผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ N,N-dimethyl-p-phenylenediamine และ 4-aminobenzenesulfonic acid ซึ่งทำให้พันธะของสีย้อมเอโซแตกออกจากกัน นอกจากนี้ค่าพีเอชก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำจัดสี โดยในการทดลองนี้พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งในกระบวนการกำจัดสีนี้ต้องการคาร์บอน (ซูโครส) เป็นแหล่งพลังงานด้วย

ปภาวดี โชคสุวรรณกิจ (2550) ศึกษาความสามารถของกากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา และแกลลวยแอสฟัลท์ในการลดซีโอดีและสีในน้ำกากส่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารส้มและปูนขาวเป็นโคแอกกูแลนต์โดยใช้จาร์เจสท์ และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำกากส่าเมื่อใช้กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา และแกลลวยแอสฟัลท์ร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับสารส้มและปูนขาว ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าความสามารถของกากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาและแกลลวยแอสฟัลท์ในการเป็นโคแอกกูแลนต์เพื่อลดซีโอดีและสีในน้ำกากส่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารส้มและปูนขาว พบว่าร้อยละการบำบัดซีโอดีจากการตกตะกอนที่สภาวะที่เหมาะสมด้วยปูนขาวจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือกากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา สารส้ม และแกลลวยแอสฟัลท์ ซึ่งมีค่าเป็น 40.20 30.77 22.88 และ 13.51% ตามลำดับ ส่วนร้อยละการบำบัดความเข้มสีจากการตกตะกอนด้วยปูนขาวจะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ สารส้ม กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา และแกลลวยแอสฟัลท์ ซึ่งมีค่า

เป็น 37.76 26.32 23.50 และ -15.71% ตามลำดับ ต่อมาเมื่อทำการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ร้อยละการบำบัดซีโอดีจากการตกตะกอนด้วยกากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ สารส้ม แถ์ลอยแอสฟัลท์ และปูนขาว ซึ่งมีค่าเป็น 51.92 42.24 26.87 และ 24.31% ตามลำดับ ส่วนร้อยละการบำบัดความเข้มข้นจากการตกตะกอนด้วย แถ์ลอยแอสฟัลท์จะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา สารส้ม และปูนขาว ซึ่งมีค่าการบำบัดเป็น 54.92 14.85 11.92 และ 3.20% ตามลำดับ เมื่อพิจารณากระบวนการบำบัดทั้งหมด พบว่า กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาสามารถบำบัดน้ำกากส่าร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีโดยรวมมากที่สุด คือ 67.26% (240 ก./ล. ของ H_2O_2) และปูนขาวสามารถบำบัดน้ำกากส่าร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีโดยรวมมากที่สุด 43.83% (150 ก./ล. ของ H_2O_2)

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงค้างต่อซีโอดี โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่คงค้างอยู่ในน้ำกากส่าถ้ามีมากจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ซีโอดี เนื่องจากเกิดการรบกวนของโพแทสเซียมไดโครเมต ซึ่งจากผลการทดลองที่มีการนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากวนผสมกับน้ำกากส่า พบว่า หลังจากตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาตั้งแต่ 12 ชั่วโมงเป็นต้นไป ค่าซีโอดีจากผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ยังคงค้างอยู่มีผลต่อซีโอดีน้อยมากหรือแทบไม่มีผล