

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอเริ่มต้นตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบ คือ เส้นใย ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมขั้นต้น ต่อจากนั้นก็จะเป็นขั้นตอนการปั่นด้าย การทอหรือการถักผ้า การฟอกย้อมพิมพ์ และสุดท้ายเป็นอุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป จึงอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 5 กระบวนการ (นันทยา ยานูเมศ,2534) คือ

ขั้นตอนที่ 1 การผลิตเส้นใย (fiber production)

ขั้นตอนที่ 2 การปั่นด้าย (spinning)

ขั้นตอนที่ 3 การทอ-ถักผ้า (weaving-knitting)

ขั้นตอนที่ 4 การฟอก-ย้อม (textile finishing)

ขั้นตอนที่ 5 การผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป (garment manufacturing)

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการฟอกย้อม เนื่องจากขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีในการปรับเปลี่ยนคุณภาพเส้นใยให้เหมาะต่อการย้อมสีและมีความต้องการใช้น้ำในปริมาณมาก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะขกกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการในการฟอกย้อม

ขั้นตอนการผลิตอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยกระบวนการหลักๆ คือ กระบวนการเตรียมผ้าสำหรับการย้อมและการย้อมสี

2.1.1 การเตรียมผ้าสำหรับการย้อม

การเตรียมผ้าเป็นการขจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนต่างๆในเส้นใยเพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสิ่งทอให้พร้อมสำหรับการย้อม-พิมพ์หรือตกแต่งสำเร็จในลำดับต่อไป กระบวนการเตรียมเส้นใยผ้ามีหลายขั้นตอนแตกต่างกันตามชนิดของเส้นใยและลักษณะของผ้า ถ้าเป็นเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีความสะอาดอยู่แล้ว ดังนั้นกระบวนการเตรียมจึงไม่มีความยุ่งยาก ส่วนเส้นใยฝ้ายซึ่ง

เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มาก กรรมวิธีการเตรียมผ้าจึงค่อนข้างยุ่งยาก (เกษม พิพัฒน์ปัญญากุล, 2541) ดังนั้นกระบวนการเตรียมผ้าที่จะกล่าวต่อไปคือการเตรียมผ้าจากเส้นใยฝ้ายซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

การเผาขน (singeing)

ผ้าใยสั้นเมื่อทอเสร็จแล้วจะมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาบนผิวผ้ามาก ทำให้ดูไม่สวยและยังเป็นอุปสรรคต่อการย้อมสีหรือการตกแต่งอีกด้วย เพราะถ้าเป็นเส้นใยใหญ่จะทำให้เนื้อผ้าบริเวณปลายเส้นใยนอนแบนราบลงไปทับนั้นดูดติดสีได้น้อย ดังนั้นต้องเผาเอาปลายขนเหล่านี้ออกเสียก่อน การเผาขนทำได้โดยการใช้ความร้อนซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ เปลวไฟแก๊สแผ่น โลหะร้อนและไฟฟ้า แต่การเผาด้วยเปลวไฟแก๊สเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าเพราะมีประสิทธิภาพสูง และการเดินเครื่องจักรง่าย (เกษม พิพัฒน์ปัญญากุล, 2541) และเนื่องจากเปลวไฟแก๊สสามารถผ่านเข้าไปเผาปลายเส้นใยที่โผล่พ้นผิวเส้นด้ายในโครงสร้างของผ้าได้ ส่วนการใช้แผ่นโลหะร้อนจะเผาเฉพาะที่ผิวผ้าจริงๆ เท่านั้น (อัจฉราพร ไชละศุต, 2527)

การลอกแป้ง (desizing)

แป้งที่ติดในเส้นใยผ้าเกิดจากการลงแป้งด้ายยืนในกระบวนการทอผ้า ทำให้การทอมีประสิทธิภาพที่ดี เส้นด้ายไม่ขาดง่าย ดังนั้นต้องมีการลอกแป้งออกก่อนเพื่อให้เส้นใยผ้าเปียกน้ำได้ดี เป็นผลให้กระบวนการผลิตขั้นต่อไปมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประหยัดเวลาและสารเคมี สารเคมีที่นิยมใช้ในการลอกแป้งมี 2 ประเภท (เกษม พิพัฒน์ปัญญากุล, 2541) คือ

- สารลอกแป้งประเภทสารเอนไซม์ (enzyme desizing) โดยการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สารอินทรีย์สลายตัวเร็วขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการลอกแป้งคือ แอลฟา-อะมีเลส ซึ่งจะไปเร่งการสลายตัวของแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล บางครั้งต้องใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับการใช้ เอนไซม์ด้วยเพื่อให้ผ้าสามารถเปียกน้ำและซึมน้ำได้ดีขึ้น

- สารออกซิไดซิงส์ (oxidizing agent) สารออกซิไดซิงส์ที่ใช้ในการลอกแป้ง เช่น โซเดียมเปอร์ซัลเฟต โปตัสเซียมเปอร์ซัลเฟต แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การขจัดสิ่งสกปรก (scouring)

เส้นใยฝ้ายจะมีสิ่งสกปรกตามธรรมชาติเจือปนอยู่ เช่น ขี้ผึ้ง เพคติน โปรตีน และเศษเปลือกเมล็ดฝ้าย การขจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ก่อนการย้อมสีทำให้เส้นใยสะอาด มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดี เบียดได้ง่ายและยังช่วยให้สีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต่อไปซึมทะลุเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น

วิธีขจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยทำได้โดยต้มกับสารละลายต่าง (โซดาไฟและโซดาแอช) และผสมกับสารลดความตึงผิว เช่น สบู่หรือผงซักฟอกลง ทำให้ฝ้ายพองตัวและสิ่งสกปรกในเส้นใยบางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นสารที่ละลายน้ำได้ บางส่วนถูกกำจัดออกไปเป็นสารแขวนลอย (เกษม พิพัฒน์ปัญญากุล, 2541)

การฟอกขาว

ผ้าที่ผ่านการขจัดสิ่งสกปรกแล้วจะยังคงมีสีซึ่งเป็นสีตามธรรมชาติของเส้นใยปรากฏอยู่ ดังนั้นการฟอกขาวจึงมีความจำเป็นโดยเฉพาะผ้าที่นำไปเป็นผ้าขาวหรือฝ้ายย้อมสีอ่อน เพื่อให้ได้ผ้าขาวหรือสีที่สดใส

การฟอกขาวอาจกระทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีดักซัน และวิธีออกซิเดชัน แต่ในปัจจุบันนิยมใช้วิธีออกซิเดชัน กระทำได้โดยใช้สารเคมีที่มีอำนาจในการออกซิไดส์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารประกอบเปอร์ออกไซด์อื่นๆ การเลือกใช้สารเคมีตัวใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย เครื่องมือที่ใช้ในการฟอก และความต้องการในการนำสิ่งทอที่ฟอกไปใช้งาน

การฟอกขาวที่สมบูรณ์ได้ผลดังนี้ คือ ได้ผ้าที่มีความขาวสม่ำเสมอและถาวร เมื่อเก็บไว้นานๆผ้าไม่กลับเป็นสีเหลือง และผ้าที่ฟอกแล้วต้องมีการดูดซึมน้ำและสารเคมีสม่ำเสมอรวมทั้งไม่ทำให้ผ้าเปื่อย (เกษม พิพัฒน์ปัญญากุล, 2541)

การชุบมัน (mercerization)

วัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้เพื่อเพิ่มความมันของผ้า ทำให้เส้นใยอ่อนนุ่มและ ดูดซึ่มสี ย้อมได้มากขึ้น การชุบมันทำได้โดยนำผ้ามาผ่านด้วยสารละลายโซดาไฟเข้มข้นโดยให้สารละลาย โซดาไฟซึมเข้าไปในเส้นใยทั้งที่ผ้ายังถูกดึงให้ตึงอยู่และล้างโซดาไฟออกโดยเร็วด้วยน้ำ ซึ่งจะทำให้ ผ้ามีความมัน และลักษณะการบิดเป็นเกลียวของเส้นใยหรือส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบน้อยลง เพราะเส้นใยพองตัวใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้เส้นใยอ่อนนุ่มขึ้นและดูดซึ่มสีย้อมและสารเคมีดีขึ้น

2.1.2 การย้อมสี

ผ้าที่ผ่านกระบวนการเตรียมผ้าแล้วต่อไปก็จะเป็นขั้นตอนการย้อมสี ซึ่งหลักการสำคัญ ของการย้อมสี คือ การทำให้สีติดผ้าสม่ำเสมอเหมือนกันตลอด สีย้อมจะต้องติดเส้นใยเข้าไปถึง ภายใน จะติดแต่เฉพาะรอบนอกเท่านั้นไม่ได้ และสีย้อมเมื่อติดบนเส้นใยแล้วต้องทนทานต่อการ ซักล้างไม่หลุดลอกออกง่าย ซึ่งการย้อมสีให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์จะต้องเข้าใจปัจจัยต่างๆที่มีผล ต่อการดูดติดสีของเส้นใย เช่น การใช้สีย้อมแต่ละประเภทให้เหมาะสมกับลักษณะเส้นใยแต่ละ ชนิด (ตาราง 2.1) และการใช้ประเภทของสารช่วยย้อมให้เหมาะสม

ชนิดและลักษณะของเส้นใย

เส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมืออยู่หลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ (เกษม พิพัฒน์ปัญญากุล,2541) คือ

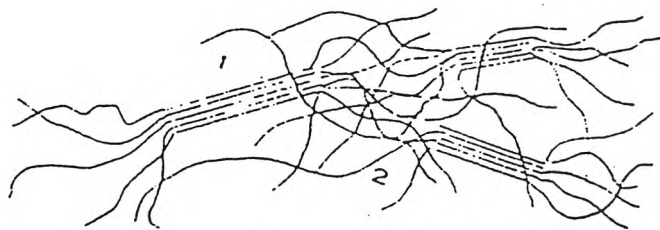
- ก. เส้นใยธรรมชาติ ประกอบด้วย
 - เส้นใยจากพืช เป็นเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ ฝ้าย ปอ ลินิน
 - เส้นใยจากสัตว์ เป็นเส้นใยโปรตีน ได้แก่ ไหม ขนแกะ
- ข. เส้นใยประดิษฐ์ ประกอบด้วย
 - เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ ได้แก่ เรยอน
 - เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะครีลิก เป็นต้น

ตาราง 2.1 ประเภทสีที่ใช้กับเส้นใยแต่ละชนิด (Duff and Sinclair., 1989)

เส้นใย	ชนิดสี
เซลลูโลส	ไดเรกท์, ซัลเฟอร์, อะโซอิก, แวต, รีแอคทีฟ
โปรตีน	เอซิด, มอเดนท์, รีแอคทีฟ
ไนลอน	ดีสเพอร์ส, แอซิด, มอเดนท์,
อะคริลิก	เบสิค,เอซิด
โพลีเอสเตอร์	ดีสเพอร์ส

เส้นใยทุกชนิดมีลักษณะเหมือนกันอยู่อย่างหนึ่ง คือ ประกอบด้วยโมเลกุลเล็กๆต่อกันเป็นเส้นยาวเหมือนเชือก เช่น ไนล่อนจะเป็นโพลีเพปไทด์ (polypeptide) ฝ้ายและเรยอนจะเป็นโพลีเซลโลไบโอส (polycellobiose) ส่วนไนลอนจะเป็นโพลีเอไมด์ (polyamide) เมื่อนำเส้นใยไปดยีย้อมจะทำให้การเรียงตัวของโมเลกุลดีขึ้น ซึ่งการเรียงตัวภายในเส้นใยอาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วน (รูปที่ 2.1) คือ ส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบจะเรียกว่า คริสตอลไลต์หรือไมเซลล์ (crystallites or micelles) และส่วนที่สองจะเป็นการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือเรียงตัวกันอย่างหลวมๆเรียกว่าช่องว่าง (จักรวาทร์ ไคละสุต, 2527)

เมื่อเส้นใยเปียกน้ำจะทำให้เส้นใยพองตัว ซึ่งจะเกิดเฉพาะบริเวณเส้นใยที่มีการเรียงตัวกันอย่างหลวมๆทำให้ช่องว่างในเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น โมเลกุลของสีย้อมก็สามารถผ่านเข้าเส้นใยได้ นอกจากนี้ต้องมีอำนาจอีกอย่างหนึ่งมาทำให้ตัวสีย้อมแยกตัวออกจากน้ำและดูดติดกับเส้นใย นั่นคือกลุ่มเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวสีและเส้นใย (จักรวาทร์ ไคละสุต, 2527)



1. คือส่วนที่เป็นคริสตอลไลต์ 2. คือส่วนที่เรียงตัวกันอย่างหลวมๆ

รูปที่ 2.1 ลักษณะการเรียงตัวของเซลลูโลสภายในเส้นใย

การรวมตัวของสีย้อมกับเส้นใย

การย้อมสีให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีย้อมกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีย้อมกับน้ำ และสามารถทำให้เกิดภาวะเช่นนี้ได้ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอม ซึ่งถูกเรียงตัวกันในลักษณะที่ถูกทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วทำให้เกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆว่ามีอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด (อัจฉราพร ไสละสุต, 2527) ที่ทำให้สีย้อมดูดติดกับเส้นใยได้ คือ

- ก. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)
- ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals' forces)
- ค. แรงไอออนิก (ionic forces)
- ง. พันธะโควาเลนต์ (covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่แต่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็เกิดขึ้นพร้อมกันด้วยแรงทั้ง 4 ชนิด สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้สีย้อมติดเส้นใยได้ดีที่สุดได้แก่ พันธะโควาเลนต์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสีย้อม หรืออาจกล่าวอย่างง่าย ๆ ว่า รูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น จะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและผลทางฟิสิกส์ร่วมกัน

สารช่วยย้อม (additives)

สารช่วยย้อมเป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในการบวนการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้มีการดูดติดสีได้มากขึ้น สม่่าเสมอมากขึ้นและทำให้สีย้อมติดเส้นใยแล้วมีความคงทนขึ้น สารช่วยย้อมมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภทด้วยกัน คือ

- กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนเมื่อใช้สีย้อมอะซิติก
- ด่าง ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะซิติก แวตและกำมะถัน
- เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมอะซิติกและการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวต ดิสเพอร์สและสีอะซิติกบางชนิด
- สารพา (carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารละลายอินทรีย์ จะใช้ย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

2.2 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทาซีน โทลูอิน แนพทาลินและพาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการในเตาชั้น แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (intermediates) และสารตัวกลางที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมา มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

2.2.1 การเกิดสีของสีย้อม

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527) กล่าวว่าสีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า "โครโมฟอร์" (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) : $-NO$ (หรือ $=N-OH$)
- กลุ่มไนโตร (nitro group): $-NO_2$ (หรือ $=NO.OH$)
- กลุ่มอะโซ (azo group): $-N=N-$

- กลุ่มเอทิลีน (ethylene group): $\begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ \text{C}=\text{C} \\ \diagdown \quad \diagup \end{array}$
- กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group): $\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagdown \end{array}$
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group): $\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C}=\text{NH} \\ \diagdown \end{array}$ และ $-\text{CH}=\text{N}-$
- กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group): $\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C}=\text{S} \\ \diagdown \end{array}$ และ $-\text{C}-\text{S}-\text{S}-\text{C}-$

กลุ่มอะตอมต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม” (auxochromes) (ตารางที่ 2.2) เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน” (chromagen) ทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครมและโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2.2 กลุ่มอะตอมออกโซโครม (Rangnekar และ Singh, 1980)

Name	Group	Name	Group
Amino	$-\text{NH}_2$	Chloro	$-\text{Cl}$
Methylamino	$-\text{NHCH}_3$	Methyl	$-\text{CH}_3$
Dimethyl amino	$-\text{N}(\text{CH}_3)_2$	Methoxy	$-\text{OCH}_3$
Sulphonic acid	$-\text{SO}_3\text{H}$	Cyano	$-\text{CN}$
Hydroxy	$-\text{OH}$	Acetyl	$-\text{COCH}_3$
Carboxylic acid	$-\text{COOH}$	Amido	$-\text{CONH}_2$

2.2.2 การจำแนกสีย้อม

Rangnekar และ Singh(1980) กล่าวว่าสามารถจำแนกสีย้อมได้ 2 วิธี คือจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งานและจำแนกสีย้อมจากโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบเคมีจะมีความยุ่งยากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ศึกษาทางด้านเคมีมาโดยตรง และสีกลุ่มเคมีเดียวกันยังมีวิธีการย้อมแตกต่างกัน เช่น สีในกลุ่มอะโซบางตัวย้อมง่าย ๆ โดยตรง บางตัวจะติดเส้นใยได้เมื่อน้ำย้อมภาวะเป็นกรด และบางตัวจำเป็นต้องมีสารบางอย่างมาช่วยจึงจะติดเส้นใย จึงทำให้จดจำได้ยาก ดังนั้นการจำแนกสีย้อมตามวิธีในการย้อมเป็นที่นิยมมากกว่า และเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกสีตามส่วนประกอบทางเคมีก็ยังมีประโยชน์ในการศึกษาถึงกลไกการบำบัดน้ำเสียสีของโรงงานฟอกย้อม ดังนั้นหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงการจำแนกสีย้อมทั้งแบบทางโครงสร้างเคมีและแบบการนำไปใช้งาน ดังนี้

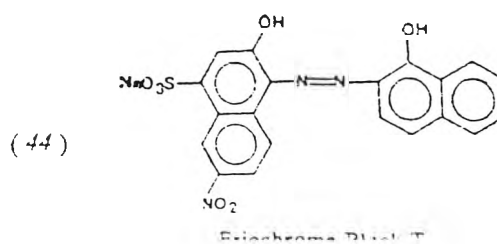
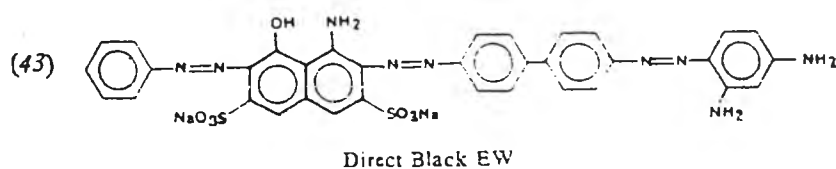
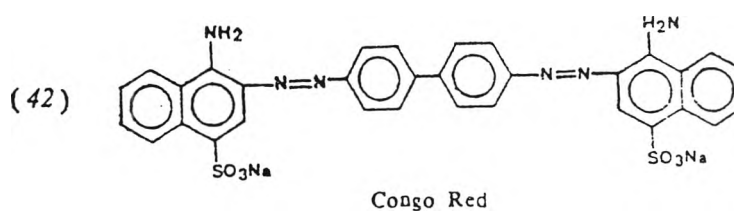
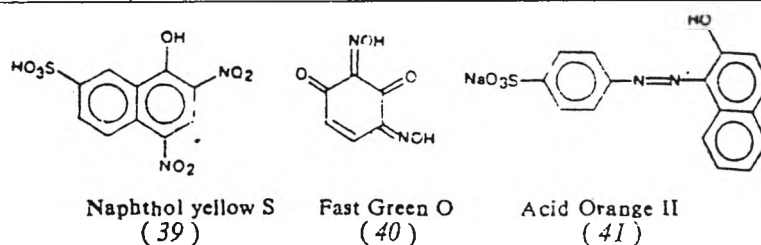
การจำแนกสีย้อมจากโครงสร้างทางเคมี

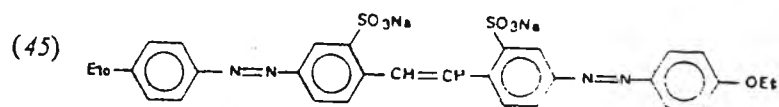
ตาราง 2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (Rangnekar และ Singh,1980)

Class	Subclass	Example	Structure
Nitro	-	Naphthol yellow S	(39)
Nitroso	-	Fast Green O	(40)
Azo	Monoazo	Acid Orange II	(41)
	Diazo	Congo Red	(42)
	Triazo	Direct Black EW	(43)
	Polyazo	-	
	Mordant azo	Eriochrome Black T	(44)
	Stilbene azo	Chrysophenine G	(45)
	Pyrazolone azo	Tartrazine	(46)
Diphenylmethane	-	Auramine O	(47)
Triphenylmethane	-	Malachite Green	(48)
Xanthene	-	Fluorescein	(49)
Acridine	-	Acridine Orange NO	(50)
Thiazole	-	Basic Yellow T	(51)
Indamine&Indophenol	-	Toluylene Blue	(52)
Azine	-	Safranin T	(53)

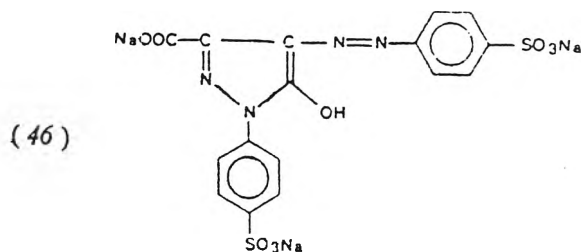
ตาราง 2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (Rangnekar และ Singh, 1980) (ต่อ)

Class	Subclass	Example	Structure
Oxazine	-	Capri Blue GN	(54)
Thiazine	-	Methylene Blue	(55)
Cyanine	Methine	Astrafloxine FF	(56)
	Quinoline	Kryptocyanine	(57)
Sulphur	-	Sulphur Black T	(58)
Lactone	-	Resoflavine W	(59)
Aminoketone	-	Helindon Brown CR	(60)
Hydroxy ketone	-	Alizarin Dark Green W	(61)
Anthraquinonoid	-	Perlon Fast Green 3B	(62)
Indigoid	-	Indigo	
Sulphurized vat dyes	-	Hydron Blue R	(64)
Phthalocyanine	-	Monastral Fast Blue BS	(65)

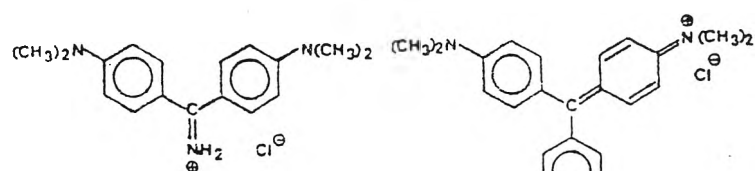




Chrysophenine G



Tartrazine

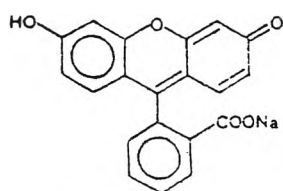
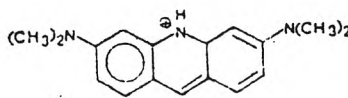
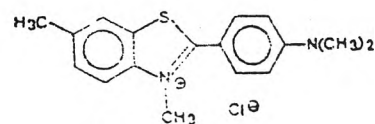
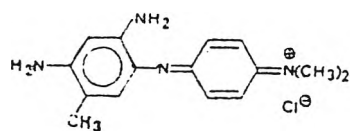
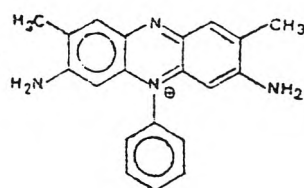
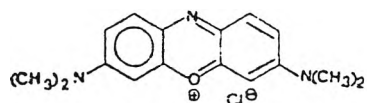
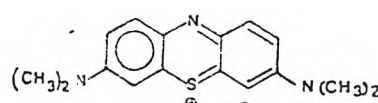
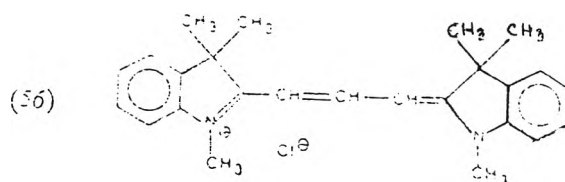


Auramine O

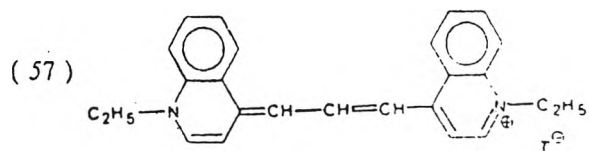
Malachite Green

(47)

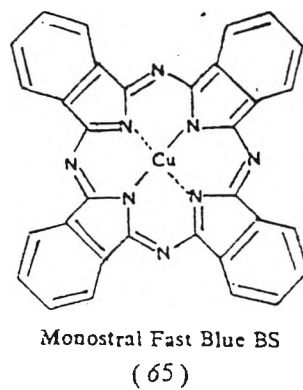
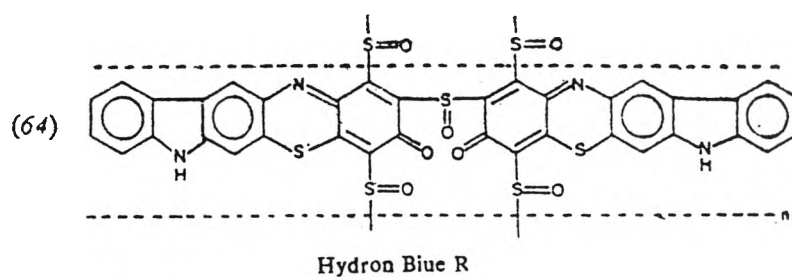
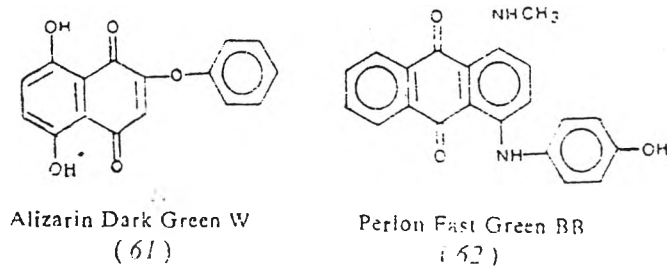
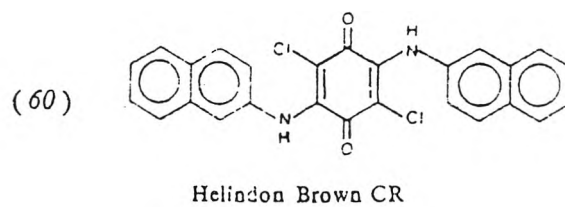
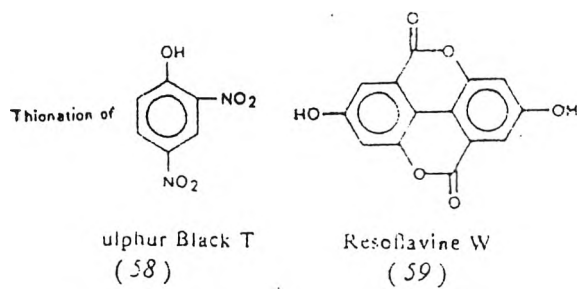
(48)

Fluorescein
(49)Acridine Orange NO
(50)Basic Yellow T
(51)Toluylene Blue
(52)Safranin T
(53)Capri Blue GN
(54)Methylene Blue
(55)

Astraflaxine FF



Kreptocyanine



การจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งาน (Rangnekar และ Singh, 1980)

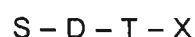
- สีเอซิด (acid dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยโปรตีนและเส้นใยไพลอน ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวก อะโซ ไตรฟีนิลมีเทน และแอนทราควิโนน สามารถละลายน้ำได้ดี และตัวสีจะให้ประจุลบ ย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิกในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง
- สีมอดแดนท์ (mordant dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยโปรตีน สามารถละลายน้ำได้ดี ตัวสี กลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นตัวสีในกลุ่มเอซิดที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียมและเหล็ก ในกระบวนการย้อมต้องมีการเติมเกลือของโลหะ เช่น โซเดียมไดโครเมต ทำให้สีติดเส้นใยด้วยพันธะเชิงซ้อน และพันธะโคเวเลนต์
- สีเบสิก (basic dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยอะครีลิกและสามารถละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวก ไดฟีนิลมีเทน ไตรฟีนิลมีเทน ออกซาซีน ไทอาซีน และอะโซ ตัวสีย้อมจะให้ประจุบวกซึ่งสามารถย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิก
- สีไดเรกต์ (direct dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลส สามารถละลายน้ำได้ดี สีกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มอะตอมอะโซ และในกระบวนการย้อมต้องมีการเติมสารอิลเลกโตรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต เพื่อช่วยให้สีซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้มากขึ้น ซึ่งสีย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิกหรือแรงแวนเดอร์วาลส์
- สีดีสเพอร์ส (disperse dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตรท ไนลอนและโพลีเอสเตอร์ ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซและแอนทราควิโนน ไม่สามารถละลายน้ำได้หรือละลายได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นตัวสีจะอยู่ในรูปคอลลอยด์ ต้องย้อมในสภาวะที่มี อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้สีย้อมกระจายตัวเข้าไปใกล้เส้นใยและสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

- สีอะโซอิก (azoic dyes) เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส เป็นกลุ่มสีที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ แต่ไม่สามารถละลายน้ำ
- สีย้อมแวต (vat dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลส ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมี เป็นพวกแอนทราควิโนน เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำจึงต้องมีการเติมสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงสามารถละลายน้ำได้ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้กันได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีการย้อมทำได้โดยนำผ้าไปแช่ในน้ำย้อม และเมื่อสีย้อมเข้าไปในเส้นใยแล้ว นำผ้าไปสัมผัสกับอากาศ ทำให้สีย้อมถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็นไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม จึงทำให้สีติดเส้นใย
- สีซัลเฟอร์ (sulphur dyes) เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลส ไม่ละลายน้ำดังนั้นต้องละลายสีย้อมด้วยการใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารรีดิวซ์ และเมื่อสีย้อมเข้าไปในเส้นใยและนำเส้นใยไปสัมผัสกับอากาศทำให้ สีย้อมถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็นไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม จึงทำให้สีติดเส้นใย
- สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dyes) เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด สามารถละลายน้ำได้ดีและตัวสีย้อมจะให้ประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่างโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิออนในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งทำให้สียึดติดเส้นใยได้ดี

2.3 สีย้อมรีแอคทีฟ

2.3.1. โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ

โครงสร้างของสีรีแอคทีฟประกอบด้วยกลุ่มเคมีพื้นฐาน 4 กลุ่ม (Shore, 1995) ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้



S คือ กลุ่มอะตอมที่ทำให้สีย้อมมีความสามารถละลายได้ดี โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิก (SO_2Na) ซึ่งกลุ่มอะตอมนี้จะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี ซึ่งเรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์

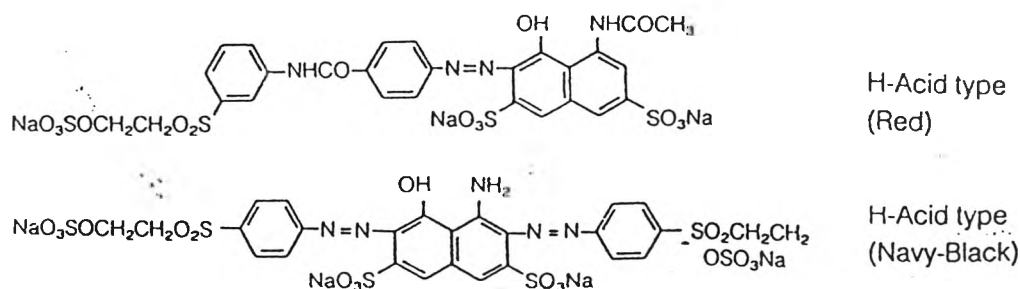
T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging group) เช่น $-\text{NH}-$, $-\text{NHCO}-$, $-\text{SO}_2-$, $-\text{NHSO}_2-$ และ $-\text{NCH}_3-$ เป็นต้น (ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟจะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรง)

X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ(reactive group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย และทำให้สียึดติดกับเส้นใย

2.3.2. กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

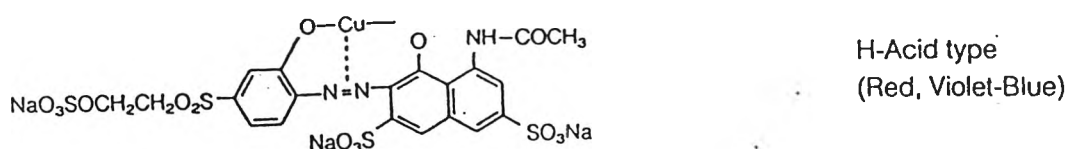
กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอซิด โดยแบ่งตามโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่ม ดังนี้

- กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสีรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบ Unmetallised Azo

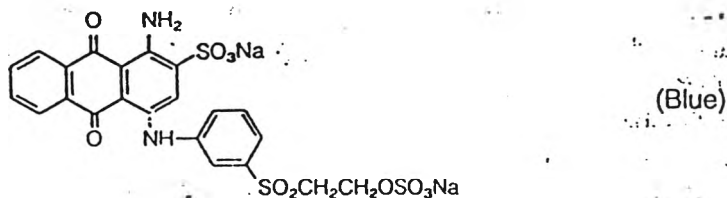
- กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสีรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบ Metal-Complex Azo

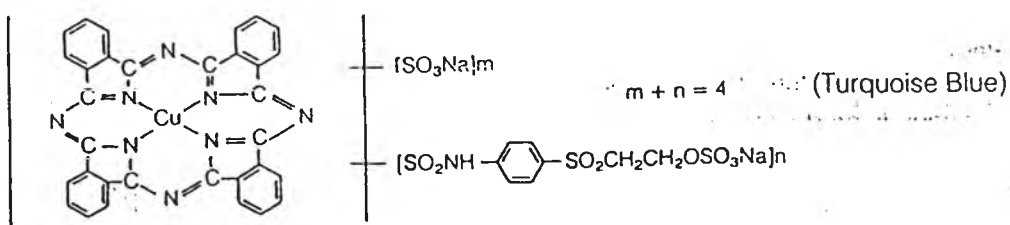


- กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Anthraquinone เป็นหลัก (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสีที่มีโครงสร้างแบบ Anthraquinone

- กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Phthalocyanine เป็นหลัก (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสีที่มีโครงสร้างแบบ Phthalocyanine

สีรีแอกทีฟที่ผลิตขึ้นใช้ในอดีตถึงปัจจุบัน สามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะโครงสร้างที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ดังตารางที่ 2.4 พบว่าสีรีแอกทีฟโดยส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นแบบอะโซ โดยเป็นแบบ Unmetallised azo 66% และ Metal-complex azo 15%

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซนต์กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้างต่างๆของสีรีแอกทีฟ (Shore, 1990)

Chemical class	Distribution in hue sector (%)								% of all reactive dyes
	Yellow	Orange	Red	Violet	Blue	Green	Brown	Black	
Unmetallised azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-complex azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1

2.3.3. กลุ่มรีแอกทีฟ

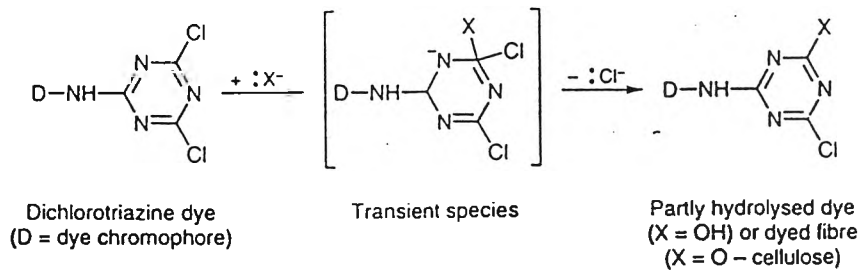
กลุ่มรีแอกทีฟเป็นกลุ่มอะตอมที่มีหน้าที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย และทำให้สีสามารถติดติดกับเส้นใยได้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่ม Monofunction คือ สีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุลของสีย้อม เช่น กลุ่มรีแอกทีฟที่มีอะตอมฮาโลเจนของสีย้อมพวกaminohalotriazine (คลอรีนหรือฟลูออรีน) หรือกลุ่มรีแอกทีฟที่มีกลุ่มไวนิลซัลโฟน (vinylsulphone)
- กลุ่ม Bifunction คือ สีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟอยู่ 2 กลุ่มในโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งทำให้ความสามารถในการติดติดกับเส้นใยสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะมีกลุ่มรีแอกทีฟที่สามารถสร้างพันธะกับเส้นใยได้เป็น 2 เท่าของกลุ่มแรก และเมื่อกลุ่มหนึ่งทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มหนึ่งก็ยังสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยได้ดีอยู่

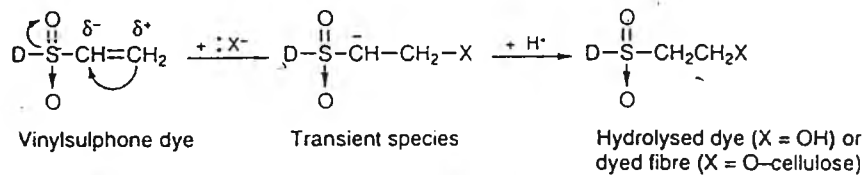
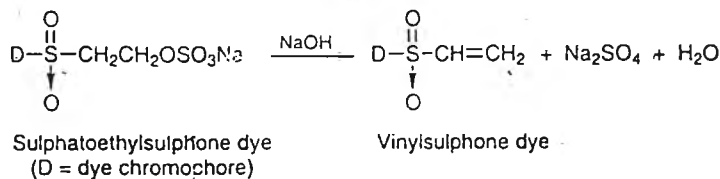
ปฏิกิริยาระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับเส้นใยสามารถแบ่งได้ 2 แบบ ดังนี้

- ไฮดรอกไซด์อิออนหรือเส้นใย ไปแทนที่อะตอมพวกฮาโลเจน (halogen) ในกลุ่มรีแอกทีฟในโมเลกุลของสีย้อม ทำให้เกิดพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution (รูปที่ 2.6)
- ไฮดรอกไซด์อิออนหรือเส้นใยสร้างพันธะกับกลุ่มรีแอกทีฟในโมเลกุลของสีย้อม โดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอมในกลุ่มไวนิลซัลโฟน (vinylsulphone) แล้วไฮดรอกไซด์อิออนจะเชื่อมกับคาร์บอนตัวท้ายของกลุ่มไวนิลซัลโฟน ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยา Nucleophilic Addition (รูปที่ 2.7)

กลุ่มรีแอกทีฟในโมเลกุลของสีย้อมสามารถสร้างพันธะได้ทั้งเส้นใยและไฮดรอกไซด์อิออน แต่ความสามารถที่สร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์อิออน โมเลกุลของสีที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์อิออนแล้ว เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์แล้ว และไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้อีก จึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution (Shore, 1995)



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition (Shore, 1995)

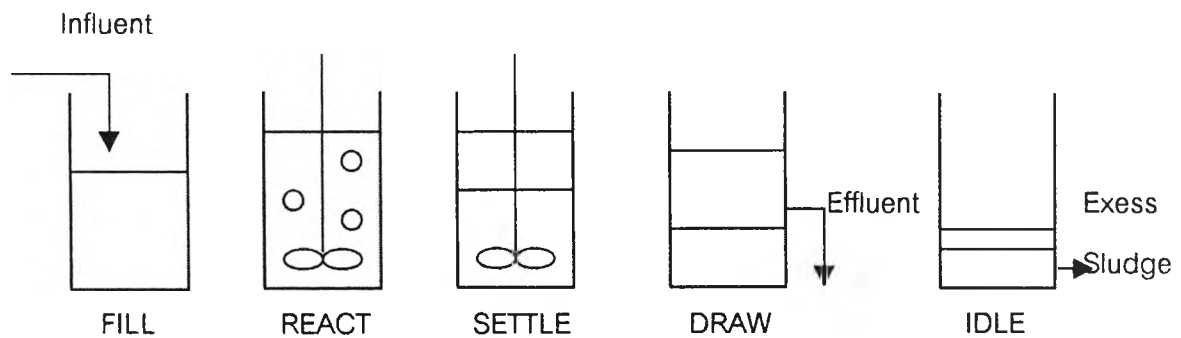
2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (sequencing batch reactor, SBR)

ระบบเอสบีอาร์ได้พัฒนามาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศรุ่นแรกซึ่งเป็นแบบ Fill and Draw ที่ใช้ถังปฏิกิริยาเพียงใบเดียวในการกำจัดสารอินทรีย์และตกตะกอน และไม่มีการเวียนสลัดจ์ (external sludge recycle) ซึ่งต่างจากระบบการแยกที่เวเต็ดสลัดจ์ที่ต้องมีถังตกตะกอนแยกต่างหากและมีการเวียนสลัดจ์ ระบบเอสบีอาร์เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียแบบแบตช์ (batch) แต่ก็มีความสามารถที่นำมาใช้กับน้ำเสียที่ไหลอย่างต่อเนื่องได้ถ้าใช้ถังเติมอากาศมากกว่า 2 ใบขึ้นไป (Irvine, 1979)

2.4.1 หลักการทำงานของระบบเอสปีอาร์

ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสปีอาร์จะทำงานเป็นวัฏจักรซึ่งแต่ละวัฏจักรประกอบด้วย 5 ขั้นตอน (Metcalf & Eddy, 1991) ดังรูปที่ 2.8

ขั้นตอนการรับน้ำเสีย (fill) คือการเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จนเต็มถัง ซึ่งปกติจะมีน้ำและสลัดจ์ค้างตั้งอยู่แล้วในขั้นตอนพักระบบอยู่ประมาณ 25% ของปริมาตรถัง ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 25% ของวัฏจักร



รูปที่ 2.8 การทำงานของกระบวนการเอสปีอาร์

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา (react) ขั้นตอนนี้มีการเติมอากาศและการกวนอย่างสมบูรณ์ และใช้เวลาประมาณ 35% ของวัฏจักร

ขั้นตอนการตกตะกอน (settle) ขั้นตอนนี้ต้องไม่มีการเติมอากาศและการกวน ปล่อยให้สลัดจ์จมตัวลง ใช้เวลาประมาณ 20% ของวัฏจักร

ขั้นตอนการระบายน้ำทิ้ง (draw) ขั้นตอนนี้เป็นการปล่อยน้ำใสส่วนบนทิ้ง เหลือน้ำและสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ประมาณ 35% ของปริมาตรถัง

ขั้นตอนพักระบบ (idle) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการพักระบบในกรณีที่มีการใช้ถังเติมอากาศหลายใบเพื่อรับน้ำเสียได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งต้องมีการเหลื่อมเวลากันในการรอน้ำเสียของแต่ละ

ใบและเมื่อครบรอบการทำงานก็จะเริ่มรับน้ำเสียอีกครั้ง นอกจากนี้อาจมีการระบายสลัดจ์ส่วนเกินทิ้งในชั้นตอนนี้

ในกรณีที่ระบบเอสปีอาร์ที่ถังเติมอากาศใบเดียวไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการพักระบบและการระบายสลัดจ์ส่วนเกินทิ้งอาจทำได้ในปลายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาหรือในช่วงเริ่มต้นของขั้นตอนการตกตะกอน ส่วนความถี่และปริมาณการระบายสลัดจ์ทิ้งขึ้นอยู่กับค่าอายุสลัดจ์

2.4.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสปีอาร์

ข้อดีของระบบเอสปีอาร์มีดังนี้

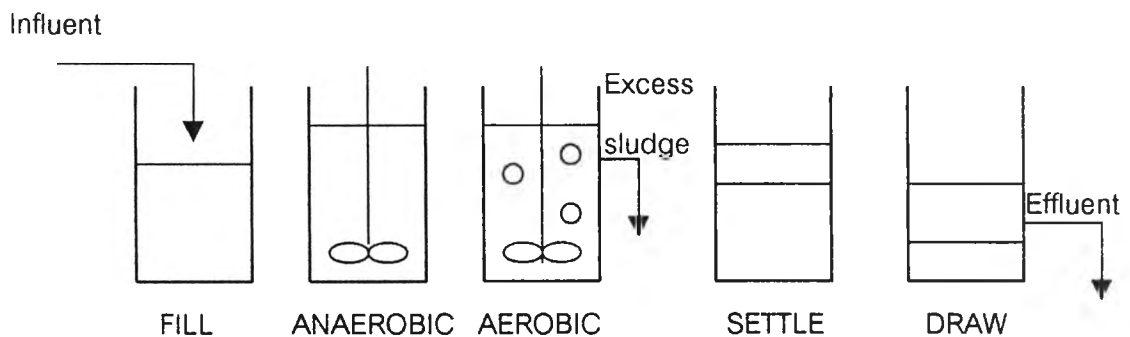
- ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบหมุนเวียนสลัดจ์ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดและการควบคุมระบบไม่มีความยุ่งยาก
- ป้องกันการเกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย
- จำกัดการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเส้นใย (filamentous bacteria) ซึ่งเป็นการป้องกันการที่สลัดจ์ไม่จมตัว
- ระบบสามารถดัดแปลงหรือปรับปรุงเพื่อเป็นกระบวนการกำจัดธาตุอาหาร (biological nutrient removal) ได้ง่าย

ข้อเสียของระบบเอสปีอาร์มีดังนี้

- การใช้ระบบเอสปีอาร์เพื่อรับน้ำเสียที่ไหลแบบต่อเนื่องและมีการไหลแบบแปรผันจะทำได้ยากแก่การควบคุม
- อาจต้องมีถังพักน้ำเสียที่มีขนาดใหญ่เพื่อความสะดวกในการควบคุมระบบ
- มีความยุ่งยากในการออกแบบระบบระบายน้ำทิ้ง (decanter) ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญเป็นอย่างมากในการออกแบบ มิฉะนั้นอาจทำให้สลัดจ์หลุดออกไปกับน้ำทิ้งได้

2.4.3 ระบบเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

ระบบเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกมีลักษณะคล้ายกับระบบเอสปีอาร์แบบธรรมดา เพียงแต่ระบบเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกจะเพิ่มขั้นตอนแอนแอโรบิกก่อนเข้าสู่ขั้นตอนแอโรบิก ดังรูปที่ 2.9 แต่ทั้งนี้อาจจะมีในเทรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในขั้นตอนแอโรบิกและเหลืออยู่ในน้ำค้างถึง ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะแอน็อกซิกก่อนเข้าสู่สภาวะแอนแอโรบิก



รูปที่ 2.9 ระบบเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

ระบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกเป็นระบบที่ถูกออกแบบเพื่อให้มีความสามารถในการกำจัดทั้งคาร์บอนอินทรีย์และฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย โดยระบบนี้ทำให้เกิดการคัณฑ์ได้จุลชีพกลุ่มหนึ่งที่สามารถสะสมปริมาณฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ได้มากกว่าปกติ

2.5 กลุ่มจุลชีพต่างๆในกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก

2.5.1 กลุ่มจุลชีพเฮเทอโรโทรฟิก (heterotrophic organisms)

- แบกทีเรียสร้างกรด (acidogenic bacteria) ในสภาวะไร้อากาศแบกทีเรียกลุ่มนี้จะปล่อยเอนไซม์ออกมานอกเซลล์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลและกรดอะมิโน ต่อจากนั้นก็ถูกแบกทีเรียดูดซึมเข้าไปในเซลล์และผ่านกระบวนการหมักภายในเซลล์ ทำให้เกิดกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวิกอินิกและกรดบิวทิริก

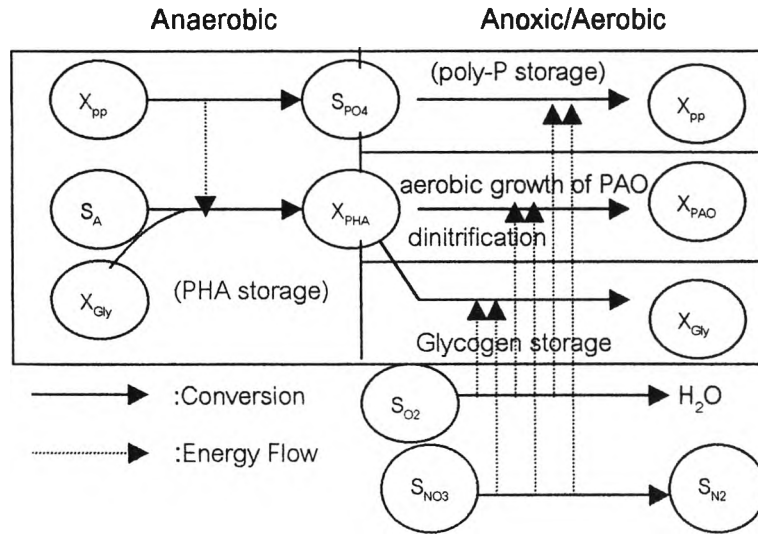
- แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง ในสภาวะแอน็อกซิกแบคทีเรียกลุ่มนี้จะสามารถเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยไนเตรตจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทนออกซิเจน และมีสารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน
- แบคทีเรียแอโรบส์ (aerobes bacteria) ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในสภาวะแอโรบิกและใช้สารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน

2.5.2 กลุ่มจุลชีพออโตโทรฟิก (autotrophic organisms)

แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง สามารถเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียให้เป็นไนเตรตในสภาวะแอโรบิกด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ซึ่งแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนี้ ได้แก่ ไนโตรไซโมนัสและแบคทีเรียไนโตรแบคเตอร์ โดยแบคทีเรียตัวแรกจะออกซิไดส์แอมโมเนียให้เป็นไนเตรตต่อจากนั้นแบคทีเรียไนโตรแบคเตอร์จะออกซิไดส์ไนเตรตไปเป็นไนเตรต

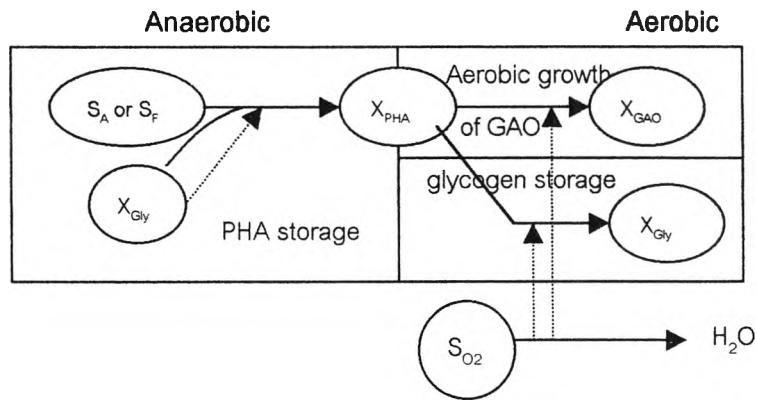
2.5.3 กลุ่มจุลชีพสะสมฟอสฟอรัส (phosphate accumulating organisms, PAOs)

เป็นกลุ่มจุลชีพที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ได้มากกว่าปกติ ซึ่งมีกลไกการทำงานดังรูปที่ 2.10 (Mino และคณะ, 1995) คือ เมื่ออยู่ในสภาวะแอนแอโรบิกแบคทีเรียกลุ่มนี้จะดูดซึมสารอาหารจำพวกกรดไขมันระเหยง่ายเช่นอะซิเตตเข้าไปภายในเซลล์และจะเก็บสะสมคาร์บอนไว้ในรูปพอลิเอชเอ (polyhydroxyalkanoate, PHA) ซึ่งในขั้นตอนนี้แบคทีเรียจะใช้พลังงานจากการย่อยสลายโพลี ฟอสเฟตที่สะสมอยู่ในเซลล์ ทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในรูปไอออนฟอสเฟต (ในน้ำจะมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง) เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกแบคทีเรียจะใช้พอลิเอชเอที่สะสมไว้ในขั้นตอนแอนแอโรบิกเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและมีการจับฟอสฟอรัสในปริมาณที่มากกว่าปกติเพื่อสะสมเป็นแหล่งพลังงานในรูปโพลีฟอสเฟต และยังมีแบคทีเรียกลุ่มนี้ บางส่วนสามารถใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทนออกซิเจนอิสระ (Mino และคณะ, 1995)



รูปที่ 2.10 กลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่สะสมฟอสฟอรัส (Mino และคณะ, 1995)

X_{PP} : Polyphosphate, X_{PHA} : Polyhydroxyalkanoate, X_{Gly} : Glycogen, X_{PAO} : Polyphosphate accumulating biomass, S_A : Fermentation Products like Acetate, S_{PO4} : Inorganic Soluble Phosphate, S_{O2} : Dissolve Oxygen, S_{NO3} : Nitrate and Nitrite



รูปที่ 2.11 กลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่สะสมกลัยโคเจน (Mino และคณะ, 1995)

2.5.4 กลุ่มจุลินทรีย์ที่สะสมกลัยโคเจน (glycogen accumulating organisms, GAOs)

Mino และคณะ(1995) กล่าวว่ากลไกการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มนี้คล้ายกับ PAOs แต่ไม่มีการสะสมฟอสฟอรัส (รูปที่ 2.11) คือเมื่ออยู่ในสภาวะแอนแอโรบิกแบกที่เรียกกลุ่มนี้จะดูดซึมสารอาหารจำพวกกรดไขมันระเหยง่ายเข้าไปในเซลล์และสะสมในรูปพีเอชเอ ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้พลังงานจากกลัยโคเจนที่สะสมไว้ในเซลล์ เมื่อเข้าสู่สภาวะแอโรบิกแบกที่เรียกจะใช้พีเอชเอเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังสะสมกลัยโคเจนส่วนหนึ่งไว้ในเซลล์

เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการจับใช้สารอาหารในสถานะแอนเอโรบิก ซึ่งในขั้นตอนนี้ GAOs ไม่มีการจับใช้ฟอสฟอรัสเพื่อสะสมไว้ในเซลล์เหมือนกับ PAOs

Sudiana และคณะ(1995) ได้ทำการศึกษากระบวนการซีบีพีอาร์ในระบบแอนเอโรบิก-แอโรบิกที่ใส่กลูโคสหรืออะซิเตตเป็นสารอาหาร พบว่าถ้าในระบบมีปริมาณฟอสฟอรัสมากเกินไป จะทำให้แบคทีเรียที่สะสมฟอสฟอรัสเป็นกลุ่มที่เด่น และทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีและมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมไว้ในเซลล์มีปริมาณสูง ส่วนในทางกลับกันถ้าในระบบมีปริมาณฟอสฟอรัสอย่างจำกัดจะทำให้แบคทีเรียที่สะสมกลัยโคเจนจะเป็นกลุ่มที่เด่น งานวิจัยของ Liu และคณะ(1997) เมื่อใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร พบว่าถ้าอัตราส่วนระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสกับปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.2 ทำให้เกิดแบคทีเรียที่สะสมฟอสฟอรัสเป็นกลุ่มเด่น และอัตราส่วนระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสกับปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.02 จะทำให้แบคทีเรียที่สะสมกลัยโคเจนเป็นกลุ่มเด่น

2.6 การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

การกำจัดสีจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมเป็นงานที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากสีย้อมที่ใช้กันนั้นมีมากมายหลายชนิดและมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน (Reife และ Freeman, 1996) นอกจากนี้ในกระบวนการย้อมผ้าก็ยังมีการใช้สารเคมีในปริมาณมาก ดังนั้นการที่จะเลือกวิธีใดในการกำจัดสีขึ้นอยู่กับชนิดของสีและกระบวนการฟอกย้อมของโรงงานแต่ละแห่ง แต่ก็สามารถสรุปวิธีต่างๆในการกำจัดสีได้ดังนี้

2.6.1 การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการทางกายภาพ

เป็นวิธีการกำจัดสีด้วยกลไกการดูดซับสีไว้บนฟล็อก ซึ่งมีความสามารถในการลดสีประเภทสีอินทรีย์หรือปิگเมนต์โดยใช้วิธีโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชันหรือการใช้ผงถ่านกัมมันต์

Panswad และ Wongchaisuwan(1986) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิกเป็นสารสร้างตะกอนในน้ำเสียสีสังเคราะห์ของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้นสี 300 มก./ม.³ พบว่าการใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิกเพียงอย่างเดียวเป็นสารสร้างตะกอนจะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลง แต่เมื่อใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิกร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารสร้างตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงขึ้นตามความเข้มข้นของแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิก คือ เมื่อใช้ความเข้มข้นของคาร์บอเนตไฮ

เดรตเบสิกต่ำกว่า 250 มก./ม.³ ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำมาก แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นคาร์บอนไฮเดรตเบสิก 500 มก./ม.³ ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงถึง 92% นอกจากนี้ Reife และ Freeman(1996) ได้กล่าวว่าการกำจัดสีด้วยวิธีโคแอกกูเลชันจะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้สีย้อมประเภทที่ละลายน้ำได้ดีและยังทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงในการใช้สารเคมีและเกิดปริมาณสลัดจ์มากซึ่งต้องเพิ่มวิธีการกำจัดสลัดจ์ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

การใช้ผงถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีพบว่ามีประสิทธิภาพการลดสีได้ดี แต่งานวิจัยของ อภิชาติ นิรัญจิตต์(2539) พบว่าปริมาณของผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและโทนสีของสีย้อม คือ ถ้าต้องการลดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโทนสีแดงและสีน้ำเงินให้ได้ 95% ต้องใช้ปริมาณของผงถ่านกัมมันต์เท่ากับ 800 และ 600 มก./ล. ตามลำดับ และยังพบว่าต้องมีการใช้สารสร้างตะกอนเพื่อช่วยให้ถ่านกัมมันต์ตกตะกอนได้ดี ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง คือ อัตราค่าใช้จ่ายของสารเคมีในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโทนสีแดงและสีน้ำเงินเท่ากับ 36.1 และ 29.3 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์ และมันสิน ตันจุลเวศม์(2540) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อมรีแอกทีฟด้วยระบบแพคท์และพบว่าประสิทธิภาพการลดสีขึ้นอยู่กับปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ คือ เมื่อใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100, 150 และ 225 มก./ล. สามารถลดสีได้ 26, 37, 50, 64 และ 68% ตามลำดับ และเมื่อใช้ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 200 มก./ล. เพื่อลดสีที่มีความเข้ม 100 SU ให้เหลือ 30 SU (ประสิทธิภาพการลดสี 70%) ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับผงถ่านกัมมันต์ประมาณ 8 บาท/ลบ.ม.

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้สารดูดติดผิวชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่าผงถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสี เช่น งานวิจัยของ Lambert และคณะ(1997) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีรีแอกทีฟด้วยสารดูดติดผิว 3 ชนิด คือ activated bauxite, fullers earth และsynthetic clay พบว่าการใช้ activated bauxite และ synthetic clay มีประสิทธิภาพการลดสีได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์ แต่ประสิทธิภาพการลดสีของ activated bauxite ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำเสียคือ ประสิทธิภาพการลดสีลดลงเมื่อพีเอชสูงกว่า 5.5 ส่วน fuller earth ไม่มีประสิทธิภาพการลดสี

2.6.2 การลดสีโดยกระบวนการทางเคมี

- การออกซิเดชัน เป็นวิธีการลดสีโดยใช้สารเคมีเป็นตัวออกซิไดส์สีย้อม และทำให้เกิดการลดสี

การใช้คลอรีนในการลดสีพบว่าประสิทธิภาพการลดสีสูง แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้มีคลอรีนเหลือตกค้างในน้ำเสีย ซึ่งอาจจะทำให้เกิดสารประกอบคลอรีน เช่น ไตรฮาโลมีเทน ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม Ghosh และคณะ(1978)(อ้างโดย Reife และ Freeman, 1996) พบว่าเมื่อใช้คลอรีน 150 มก./ล. จะมีประสิทธิภาพการลดสีจากน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมเท่ากับ 77% แต่จะมีคลอรีนตกค้างในน้ำเสียประมาณ 110 มก./ล. และเมื่อใช้คลอรีนในปริมาณที่ต่ำกว่า 100 มก./ล. จะไม่มีคลอรีนตกค้างแต่มีประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 57% เท่านั้น

ต่อมามีการใช้โอโซนซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ซึ่งที่แรงกว่าคลอรีนและไม่มีสารตกค้างในน้ำเสีย เช่น งานวิจัยของ Liakou และคณะ(1997) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมอะโซ OrangeII โดยการใช้โอโซนพบว่าสามารถตรวจพบสารตัวกลางที่เกิดจากการออกซิไดส์สีย้อม OrangeII คือ formate, benzenesulfonate และoxalate ที่เวลา 0.8, 3.2 และ3.6 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำให้อัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดีเพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่งานวิจัยของ Horning และคณะ,1977 (อ้างโดยReifeและ Freeman, 1996) พบว่าเมื่อใช้ปริมาณโอโซน 1 กรัม/ลิตร สามารถลดสีประเภทรีแอกทีฟและเบสิกได้ดี แต่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับสีย้อมประเภทดิสเพอร์ส ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสีไดเรกต์นั้นมีค่าไม่แน่นอน นอกจากนี้ผู้วิจัยได้กล่าวว่าการกำจัดสีด้วยโอโซนนั้นทำให้ลดปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ได้เพียงเล็กน้อยและต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งระบบ

งานวิจัยของ วุฒิ วิพันธ์พงษ์ และ มั่นสิน ตันทุลเวศม์(2540) ได้ทำการศึกษาการใช้สารเคมีเฟนตัน (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์+เหล็ก) ในการกำจัดสีออกจากน้ำเสียของโรงฟอกย้อม พบว่าประสิทธิภาพการลดสีขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กที่ใช้ คือประสิทธิภาพการลดสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 500 มก./ล. แต่เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 500 มก./ล. จะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่อต้องการประสิทธิภาพการลดสีให้ได้มากกว่า 80% โดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยที่สุดเท่ากับ 200 มก./ล. พบว่าต้องใช้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กเท่ากับ 5:1 สำหรับสีย้อมโทนสีดำแดง และน้ำตาลอ่อน ส่วนสีย้อมโทนสีม่วงต้องใช้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กเท่ากับ 10:1

- การรีดักชัน

จากการศึกษาของ Brown และHamburger(1987) พบว่าในสภาวะแอนแอโรบิกสามารถลดสีย้อมชนิดอะโซได้ ผู้วิจัยกล่าวว่า การลดสีเกิดจากการสลายพันธะของกลุ่มอะตอมอะโซด้วยปฏิกิริยารีดักชัน แต่เมื่อเกิดการสลายพันธะของอะโซจะทำให้เกิดสารประกอบพวกอะโรมาติกซึ่งเป็นสารพิษ และสารพวกนี้สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแอโรบิก ด้วยความรู้เรื่องนี้จึงมีการนำสารรีดิวส์ซึ่งมาใช้ในกระบวนการบำบัดขั้นต้นและตามด้วยการบำบัดน้ำเสียแบบแอโรบิกในโรงงานฟอกย้อม สารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไป คือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (sodiumhydrosulfite), ไทโอยูเรียไดออกไซด์ (thiourea dioxide) และโซเดียมฟอร์มัลดีไฮด์ซัลโฟเนต (sodium formaldehydesulfoxylate) พบว่าประสิทธิภาพการลดสีของสารรีดิวส์ซึ่งแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในน้ำเสีย เช่น ที่พีเอชเท่ากับ 4 โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์จะมีประสิทธิภาพการลดสีที่ดีที่สุด ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 10.7 ไทโอยูเรียไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการลดสีที่ดีที่สุด (Reife และ Freeman, 1996)

2.6.3 การลดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ

- กระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิก

น้ำเสียจากโรงฟอกย้อมประกอบด้วยสีย้อมและสารเคมีต่างๆที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยกระบวนการแอโรบิก (Cariell และคณะ 1995) และจากงานวิจัยของ Porter และ Shider(1976) พบว่าอัตราส่วนระหว่าง BOD_5 กับ BOD_{30} ของสีย้อมมีค่าต่ำมาก คือมีค่า BOD_{30} เท่ากับ 53,000 มก./ล.และมีค่า BOD_5 เท่ากับ 20,000 มก./ล.ซึ่งมีผลทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอโรบิกโดยทั่วไปของโรงงานฟอกย้อมมีปริมาณมวลจุลชีพต่ำ (น้อยกว่า 1,000 มก./ล.) และทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำด้วย นอกจากนี้มีงานวิจัยอื่นๆที่ใช้กระบวนการแอโรบิกในการลดสีย้อมรีแอกทีฟและพบว่ามีความมีประสิทธิภาพการลดสีต่ำมาก เช่น งานวิจัยของ กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์ และมันสิน ตันจุลเวศม์(2540) พบว่าประสิทธิภาพการลดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโทนสีม่วงแดง ฟ้ำเขียวและส้มแดง เท่ากับ 14, 14 และ 27% ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ อัมพล เตโชวานิชย์ และธงชัยพรรณสวัสดิ์(2541) พบว่าประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อม

รีแอกทีฟอะโซเท่ากับ 18% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. และ 14.6% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มก./ล.

จากการศึกษาของ Dohanyos และคณะ(1987) (อ้างโดย Reife และ Freeman, 1996) พบว่ากลไกการลดสีด้วยกระบวนการนี้คือกระบวนการทางกายภาพและกายภาพ-เคมี เช่น การแพร่, การดูดติดผิวและปฏิกิริยาเคมี พบว่าความสามารถในการลดสีขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสี ความสามารถในการลดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีกลุ่มอะตอมไฮดรอกซิล (OH) ไนโตร (nitro) และอะโซ (azo) อยู่ในโมเลกุลของสีและเมื่อสีมีโมเลกุลใหญ่ขึ้น แต่ถ้ามีกลุ่มของกรดซัลโฟนิกในโมเลกุลของสีทำให้ความสามารถในการลดสีต่ำลงเนื่องจากทำให้สีละลายน้ำได้ดี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากลไกหลักของการลดสีโดยกระบวนการแอโรบิกจะเป็นการดูดติดบนฟลอคและพบว่าสีจะเกิดการย่อยสลายได้น้อยมาก

- กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก

เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับการลดสีชนิดอะโซ จุดเริ่มต้นในการใช้กระบวนการชีวภาพแบบแอนแอโรบิกเพื่อกำจัดสีคือการพบแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีความสามารถลดสีของอาหารชนิดอะโซได้ (Cariell และคณะ, 1995) ต่อมา Gingell และ Waker, 1971 (อ้างโดย Cariell, 1995) กล่าวว่า การลดสีในน้ำเสียโดยกระบวนการแอนแอโรบิกไม่ใช่เกิดการย่อยสลายของตัวสีเนื่องจากตัวสีเป็นสารให้อิเล็กตรอนเช่นสารอินทรีย์คาร์บอนต่างๆไป แต่พันธะอะโซของสีจะทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนจาก FADN₂ (reduced flavin nucleotide) แล้วทำให้พันธะอะโซแตกออก

Brown และ Hamburger (1987) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีชนิดอะโซด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก โดยทำการศึกษากับสีย้อมชนิดอะโซ 14 ชนิด ซึ่งเป็นทั้งสีแอซิด สีไดเรกต์และสีเมอร์แดนซ์ พบว่าสีเกือบทุกชนิดถูกลดสีได้มากกว่า 90% และสารประกอบที่เกิดจากการลดสีส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอะโรมาติกอะมีน นอกจากนี้ Cariell และคณะ(1994) ได้ทำการศึกษากการลดสีที่มีโครงสร้างอื่นนอกจากชนิดอะโซ เช่น สีโครงสร้างแอนทราควิโนน และ phthalocynine พบว่าการลดสีเหล่านี้ด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกมีประสิทธิภาพต่ำมาก

Chinwetkitvanich และคณะ(2000) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีรีแอกทีฟภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยระบบยูเอเอสบี 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการสร้างกรดที่มีเวลากักน้ำ 12 ชั่วโมง และขั้นตอนการสร้างมีเทนที่มีเวลากักน้ำ 12 ชั่วโมง โดยการนำน้ำย้อมโทนสีดำ, สีแดง และสีน้ำเงินจากการย้อมครั้งที่ 1 มาเจือจางให้มีความเข้มข้น 150 SU และเติมแป้งมันเป็นสารอาหารร่วม พบว่าประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อมโทนสีดำเท่ากับ 67, 71 และ 69% เมื่อความเข้มข้นของแป้งมันเท่ากับ 500, 1,000 และ 1,500 มก./ล. ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อมโทนสีแดงเท่ากับ 36, 57 และ 56% เมื่อความเข้มข้นของแป้งมันเท่ากับ 0, 200 และ 500 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการลดสีของสีย้อมโทนสีน้ำเงินเท่ากับ 48, 52 และ 56% เมื่อความเข้มข้นของแป้งมันเท่ากับ 0, 200 และ 500 มก./ล. ตามลำดับ

- กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

การย่อยสลายของสีย้อมชนิดอะโซ ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิกจะทำให้เกิดสารประกอบพวกอะโรมาติกซึ่งบางตัวก็เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารพวกนี้ จะถูกย่อยสลายได้ยากในสภาวะแอนแอโรบิก แต่จะสามารถถูกย่อยสลายได้โดยกระบวนการแอโรบิก (Brown และHamburger,1987) ดังนั้นผู้วิจัยหลายท่านจึงให้ความสนใจกระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกเพื่อกำจัดสีย้อม ดังเช่น งานวิจัยของ Zyoan และคณะ(1992), Loyd และคณะ, 1992 (อ้างโดย Reife และ Freeman, 1996) พบว่ากระบวนการแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก มีประสิทธิภาพการลดสีและทีโอซี (total organic carbon) ได้สูงกว่ากระบวนการเอกทิวเด็คสลัดจ์ และพบว่าการลดสีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนแอนแอโรบิก นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นที่ได้กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดสีที่เกิดขึ้นในช่วงแอนแอโรบิก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณไนเตรตในระบบ พบว่าเมื่อมีไนเตรตในระบบทำให้เกิดการยับยั้งการลดสีเนื่องจากไนเตรตมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสีย้อม (Cariell และคณะ,1995; Luangdilok และ Panswad, 2000)

- ความเข้มข้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นไปทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลงเล็กน้อย แต่ปริมาณการลดสีเพิ่มขึ้น เช่น ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 ถึง 100 มก./ล. (Techovanich และคณะ, 2000) และ

ที่ความเข้มข้น 100 ถึง 200 มก./ล. (Cariell และคณะ, 1995)

- เวลาที่กักน้ำในช่วงแอนแอโรบิก เมื่อเวลาที่กักน้ำนานขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงขึ้น (Luangdilok และ Panswad, 2000; Iamsamer และคณะ, 2000 ; จินตนา เป็นสุวรรณ, 2540)

- โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม พบว่าการลดสีจะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อสีย้อมเป็นโครงสร้างอะโซ (Cariell และคณะ, 1994; Luangdilok และ Panswad, 2000)

2.7 การศึกษาที่ผ่านมา

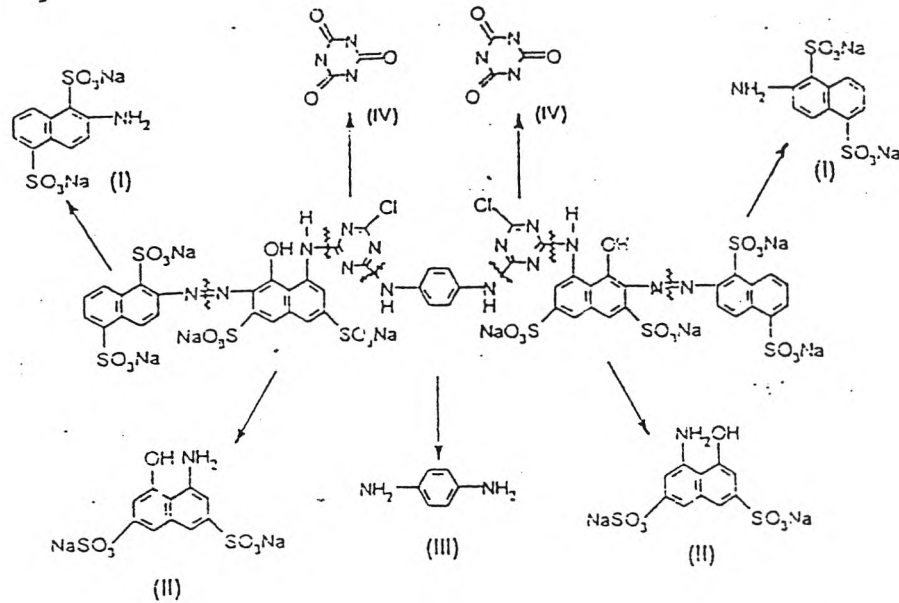
Cariell และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสีรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกัน ด้วยกระบวนการย่อยแบบแอนแอโรบิกซึ่งทำการศึกษาในขวดซีรัมปริมาตร 120 มล. มีการเติมกลูโคสเป็นสารอาหารร่วมและใช้ความเข้มข้นแต่ละชนิดเท่ากับ 100 มก./ล. นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาชนิดของสารที่เกิดขึ้นจากการย่อยสี C.I. Reactive Red 141 (เป็นสีที่มีพันธะอะโซ) ด้วยวิธี column chromatography และ proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างต่างกัน (ตารางที่ 2.5) พบว่าการกำจัดสีรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างอะโซจะมีประสิทธิภาพการลดสี 70-97% ยกเว้นสี C.I. Reactive Yellow 95 ซึ่งผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่าสีดังกล่าวอาจจะมีผลยับยั้งหรือเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ส่วนสีที่มีโครงสร้างอื่น เช่น anthraquinone และ phthalocyanine จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำมาก ผู้วิจัยได้ให้ข้อสังเกตว่าสีที่มีโครงสร้างเหล่านี้อาจมีความคงตัวมาก

ผลจากการวิเคราะห์ชนิดของสารที่เกิดจากการย่อยของสี C.I. Reactive Red 141 (รูปที่ 2.12) สารที่พบเมื่อวิเคราะห์โดย column chromatography และ NMR มี 3 ชนิด ชนิดแรกคือ 2-aminonaphthalene-1,5-disulphonic acid ชนิดที่สองคือ 1,7-diamino-8-naphtho-3,6-disulphonic acid ชนิดที่สามคือ p-diamino-benzene และผู้วิจัยกล่าวว่าสารตัวที่สี่น่าจะเป็น cyanuric acid ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีอะตอมของไฮโดรเจนจึงไม่สามารถวิเคราะห์โดยวิธี NMR ได้ จาก

ผลการทดลองนี้อาจสรุปได้ว่ากลไกการกำจัดสี C.I. Reactive Red 141 (โครงสร้างอะโซ) คือการสลายพันธะอะโซและตามด้วยการสลายพันธะระหว่างโครโมฟอร์และกลุ่มมีแอกทีฟอีกด้วย

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสีของระบบบำบัดน้ำเสียจริง ด้วยระบบ Bardenpho แบบ 5 ขั้นตอนซึ่งเป็นระบบที่สามารถกำจัดธาตุอาหารได้ โดยการเติมสี C.I. Reactive Red 141 ปริมาณ 2.5 กิโลกรัม ในขั้นตอนแอนแอโรบิก ปรากฏว่าสีหายไปภายในเวลาประมาณ 30 นาที แต่ก็ไม่อาจสรุปได้ว่าการลดสีเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ เพราะอาจเกิดเนื่องจากการเจือจางก็ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำสลัดจ์จากขั้นตอนแอนแอโรบิกและแอน็อกซิกไปทดลองในห้องปฏิบัติการและสามารถยืนยันได้ว่าการลดสีเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งจากการทดลองนี้จึงอาจสรุปได้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถกำจัดธาตุอาหารได้น่าจะมีศักยภาพในการลดสีที่มีพันธะอะโซได้ด้วย



รูปที่ 2.12 สารต่างๆที่เกิดการลดสี C.I. Reactive Red 141 (Carliell,1994)

ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองการกำจัดสีที่มีโครงสร้างต่างๆด้วยกระบวนการย่อยแบบแอนแอโรบิก (Carliell และคณะ, 1994)

	Chemical classification	Percentage decolorisation	Reaction time(h) required to attain maximum decolorisation
Reactive dye Powders			
C.I. Reactive Yellow 16	Azo	80-90	6.5
C.I Reactive Red 198a	Azo	85-90	2
C.I Reactive Red 141	Azo	85-90	4.5
C.I Reactive Blue 38	Phthalocyanine	40	4.5
C.I Reactive Blue 21	Phthalocyanine	85-90	4.5
C.I. Reactive Blue 220	Azo	90-95	1
C.I. Reactive Black 5	Azo	80-85	4.5
Reactive dye Solutions			
C.I. Reactive Yellow 95	Azo	0	-
C.I. Reactive Orange 12	Azo	90-95	23
C.I. Reactive Red 218	Azo	90-95	32
C.I. Reactive Red 24	Azo	90-97	32
C.I. Reactive Orange 13	Azo	85-90	50
C.I. reactive Brown 11	Azo	90	23
*Blue PB	metal complex	98	2
C.I. Reactive Blue 49	anthraquinone	7-10	2
C.I Reactive Black 39	azo	70-75	5.5
*Black SG	metal complex	75-80	7.5
C.I. Reactive Blue 72	phthalocyanine	25-30	50
*No C.I. number Available			

Carliell และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาลำดับโคเนติกส์ของการย่อยสลายพันธะอะโซของสีย้อมด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก นอกจากนี้ได้ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและจุลชีพ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังนี้

- ศึกษาลำดับโคเนติกส์ของการลดสีของสีย้อม C.I. Reactive Red 141 ในแต่ละความเข้มข้นคือที่ 100, 150 และ 200 มก./ล.
- ศึกษาอัตราการลดสีของสีย้อม C.I. Reactive Red 141 ที่ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มก./ล.
- ศึกษาอัตราการลดของสี C.I. Reactive Red 141 โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่มีการเติมและไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน
- ศึกษาผลการลดสีและแนวโน้มของศักย์รีดอกซ์เมื่อมีการเติมสารรับอิเล็กตรอนตัวอื่นนอกจากสีย้อม คือ ไนเทรตและซัลเฟต โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง คือ (1.) เมื่อมีสีย้อมเพียงอย่างเดียว (เป็นชุดควบคุม) (2.) เมื่อมีสีย้อมและมีการเติมไนเทรต (3.) เมื่อมีสีย้อมและการเติมซัลเฟต
- ศึกษาสารที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลดสีของสีย้อม C.I. Reactive Red 141 โดยวิธี column chromatography และ proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)
- ศึกษาความเป็นพิษของสีที่มีต่อจุลชีพในกระบวนการแอนแอโรบิกโดยใช้สีที่มีความเข้มข้นต่างๆ คือ 20, 50, 100, 200, และ 500 มก./ล. ซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างจุลชีพที่มีการปรับสภาพให้ชินและยังไม่มีการปรับสภาพให้ชินกับสี

ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลการศึกษาลำดับโคเนติกส์ของการลดสี C.I. Reactive Red 141 ด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก พบว่าการลดสีเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ที่ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มก./ล.
- อัตราการลดสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยกล่าวว่าเป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะตัวสีเองหรือสารที่เกิดขึ้นจากการย่อยสีมีผลยับยั้งหรือเป็นพิษต่อจุลชีพ
- การทดลองที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอนจะมีอัตราการลดสีต่ำมากเมื่อเทียบกับการทดลองที่มีการเติมแหล่งคาร์บอน
- เมื่อมีการเติมไนเทรตปรากฏว่าทำให้เกิดการยับยั้งการลดสีอยู่ระยะหนึ่งแต่เมื่อไนเทรตถูกรีดิวส์จนหมดจึงจะเริ่มการลดสี เมื่อมีการเติมซัลเฟตจะไม่มีผลยับยั้งดังกล่าว นอกจากนี้ค่าศักย์รีดอกซ์ก็มีบทบาทสำคัญต่อการลดสีหรืออาจกล่าวว่าการลดสีจะเกิดขึ้นที่ค่าศักย์รีดอกซ์ช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจากการสังเกตจากการทดลองนี้พบว่าการทดลองที่ (1) (ชุดควบคุม) การลดสีจะเกิดขึ้นที่ค่าศักย์รีดอกซ์ประมาณ -400 มิลลิโวลต์ ส่วนการทดลองที่ (2) พบว่าช่วงแรกที่ไม่มีการ

ลดสี (เนื่องจากไนเตรต) จะมีค่าศักยภาพรีดอกซ์ประมาณ -200 มิลลิโวลต์ และต่อมามีค่าศักยภาพรีดอกซ์จะค่อยๆ ลดลง (เนื่องจากปริมาณไนเตรตน้อยลง) จนมีค่า -400 มิลลิโวลต์ การลดสีจึงเริ่มเกิดขึ้น

- การวิเคราะห์หาชนิดของสารที่เกิดขึ้นเนื่องจากการย่อยของสี C.I. Reactive Red 141 พบว่ามีผลเหมือนกับการศึกษาของ Carliell ปี ค.ศ. 1994

- ผลการศึกษาความเป็นพิษของสีต่อจุลชีพพบว่าจุลชีพที่ผ่านการปรับให้ชินกับสีมีความคงทนกว่าจุลชีพที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้ชินกับสี ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มข้นสีสูงขึ้น เช่น ที่ความเข้มข้นสี 100-500 มก./ล.

Zyoan และคณะ (1992) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ระบบจานหมุนชีวภาพที่เป็นแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกด้วยจุลชีพร่วมระหว่างจุลชีพที่เกาะบนตัวกลาง (fixed film) และจุลชีพที่เติบโตแบบแขวนลอย (suspended growth) น้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมประกอบด้วยสีรีแอคทีฟ ดีสฟอรัส เบสิดและมีน้ำทิ้งส่วนอื่นที่ใช้ในกระบวนการเตรียมเส้นใย ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี บีโอดีและสีย้อม เท่ากับ 78.2, 95.4 และ 71% ตามลำดับ และผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบด้วยระบบจานหมุนชีวภาพแบบแอโรบิกพบว่า มีประสิทธิภาพการลดสีต่ำกว่า 60%

Chinwetkitvanich และคณะ(2000) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการบำบัดน้ำเสียสีที่มีสีรีแอคทีฟภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกด้วยระบบยูเอเอสบี ซึ่งทำการทดลองกับน้ำเสียกึ่งสังเคราะห์โดยนำน้ำจากการย้อมครั้งที่ 1 มาเจือจางและควบคุมความเข้มข้นที่ 150 SU โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

- ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดสีภายใต้โทนสีที่ต่างกัน 3 โทน คือ สีดำ, สีแดง และสีน้ำเงิน พบว่าน้ำเสียโทนสีดำมีประสิทธิภาพการลดสีประมาณ 70% ในขณะที่สีแดงและสีน้ำเงินมีประสิทธิภาพการลดสีประมาณ 60% จะเห็นว่าโทนสีที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีน้อยมาก ผู้วิจัยกล่าวว่าการลดสีของสีน้ำจะมีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีมากกว่าโทนสี

- ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดสีเมื่อมีการเติมปริมาณแหล่งคาร์บอนที่ต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพการลดสีเมื่อมีการเติมแหล่งคาร์บอนจะสูงกว่าการทดลองที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแหล่งคาร์บอนเพิ่มขึ้นก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

- ศึกษาผลของสารช่วยย่อยที่มีต่อประสิทธิภาพการลดสี โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสีสังเคราะห์โทนสีน้ำเงินที่ไม่มีการเติมสารช่วยย่อยเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์โทนสีน้ำเงิน พบว่าประสิทธิภาพการลดสีไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจสรุปว่าสารช่วยย่อยในน้ำเสียสีไม่น่าจะมีผลต่อกระบวนการลดสีของจุลชีพ

- ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมื่อความเข้มข้นต่างกันคือที่ 0, 50 และ 100 SU ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการลดสีใกล้เคียงกัน แสดงว่าความเข้มข้นที่ 150 SU ยังไม่เป็นพิษต่อจุลชีพ

Pansuwan และคณะ(1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อมของระบบเอสบีอาร์แบบธรรมดา (เอเอส) กับ ระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลองดังนี้

- เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีจากน้ำเสียสีจากโรงงานฟอกย้อม 3 ประเภท คือ สีดีสเพอร์ส, สีซัลเฟอร์และสีรีแอคทีฟ โดยใช้ระบบเอสบีอาร์ทั้ง 2 แบบ พบว่าระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกมีประสิทธิภาพการกำจัดสีและฟอสฟอรัสของน้ำเสียสีทั้ง 3 ชนิด สูงกว่าระบบเอสบีอาร์แบบธรรมดา

- ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกที่มีเวลากักน้ำในช่วงแอนแอโรบิกต่างกัน ซึ่งแบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ (1.) เวลาแอนแอโรบิก+แอโรบิก เท่ากับ 8+2 ชั่วโมง (2.) เวลาแอนแอโรบิก+แอโรบิก เท่ากับ 20+2 ซึ่งทั้ง 2 การทดลองนี้ทดลองเฉพาะน้ำเสียสีรีแอคทีฟ พบว่าการทดลองที่เวลากักน้ำในช่วงแอนแอโรบิกนานกว่า (การทดลองที่ 1) จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงกว่า

Iamsamer และคณะ(2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิดอะโซด้วยแบบจำลองขนาดโต๊ะทดลองระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ภายใต้สารอาหารและเวลาแอนแอโรบิกที่ต่างกัน โดยทำการศึกษาที่น้ำเสียสีสังเคราะห์ที่ใช้สี C.I. Reactive Black 5 ที่มีความเข้มข้น 10 มก./ล. มีรายละเอียดดังนี้

- ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมื่อใช้สารอาหารต่างกัน คือ การทดลองชุดที่ (1.) ใช้ไนโตรเจนบรอนซ์+โซเดียมอะซิเตตเป็นสารอาหารที่ 250+250 มก./ล. ซีโอดี และการทดลองชุดที่ (2.) ใช้ กลูโคสเป็นสารอาหารที่ 500 มก./ล. ซึ่งทั้งสองการทดลองมีการเติมฟอสฟอรัสมากกว่าปกติ เพื่อส่งเสริมกระบวนการบีโธอาร์ซึ่งจะเป็นจุลชีพที่สามารถสะสมฟอสฟอรัส (PAOs) และมีเวลาทำงานแอนแอโรบิก+แอโรบิก เท่ากับ 18+5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการลดสีของการทดลองชุด

ที่ (1.) และการทดลองชุดที่ (2.) เท่ากับร้อยละ 71 และ 68 ในหน่วย SU และเท่ากับ ร้อยละ 73 และ 66 ในหน่วย ADMI จากการศึกษานี้อาจกล่าวได้ว่าสารอาหารมีผลต่อประสิทธิภาพการลดสี แต่ก็ไม่มากนัก

- ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีภายใต้เวลาแอนแอโรบิกที่ต่างกัน โดยทำการทดลองในชุดที่ (3.) ใช้กลูโคสเป็นสารอาหารที่ 500 มก./ล.ซีไอดี และมีการเติมธาตุอาหารเพื่อส่งเสริมกระบวนการบีฟิอาร์เหมือนชุดการทดลองที่ (2.) แต่มีเวลาแอนแอโรบิก+แอโรบิก เท่ากับ 6+5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการลดสีของการทดลองชุดที่ (2.) และชุดที่ (3.) เท่ากับร้อยละ 68 และ 63 ในหน่วย SU และเท่ากับร้อยละ 66 และ 59 ในหน่วย ADMI ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มเวลาช่วงแอนแอโรบิกจาก 6 ชั่วโมง เป็น 18 ชั่วโมง ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

- ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดสีระหว่างจุลชีพที่ต่างกันระหว่างกลุ่มจุลชีพที่สะสมฟอสฟอรัส (PAOs) และกลุ่มจุลชีพที่สะสมกลัยโคเจน (GAOs) ซึ่งได้ทำการทดลองชุดที่ (4.) ใช้กลูโคสเป็นสารอาหารที่ 500 มก./ล.ซีไอดี และมีการจำกัดปริมาณฟอสฟอรัสเพื่อเหนี่ยวนำให้ระบบที่มีแบคทีเรีย GAOs พบว่าประสิทธิภาพการลดสีของการทดลอง เท่ากับร้อยละ 66 ในหน่วย SU และ เท่ากับร้อยละ 64 ในหน่วย ADMI ซึ่งสรุปว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของ GAOs ไม่ต่างจากของ PAOs

Techovanich และคณะ(2000) ทำการศึกษามลของระยะเวลาแอนแอโรบิกและความเข้มข้นที่มีต่อประสิทธิภาพการลดสีโดยใช้แบบจำลองขนาดโต๊ะทดลองระบบเอสบี อาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกที่มีเวลาวัฏจักรของระบบเท่ากับ 12 ชั่วโมง และมีอายุสัปดาห์เท่ากับ 8 วัน โดยใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์ที่มีซีไอดีเท่ากับ 500มก./ล.ซีไอดี ซึ่งสีย้อมที่ใช้คือ สีรีแอกทีฟชนิดอะโซ (C.I. Reactive Black) โดยทำการทดลองมีระยะเวลา แอนแอโรบิก+แอโรบิก ต่างกัน 3 ค่า ดังนี้ คือ 0+11 (เอเอส), 2+9 (Ana2) และ 4+7 (Ana4) ชั่วโมง และแต่ละการทดลองใช้ความเข้มข้นต่างกัน 2 ค่า คือ 10 และ 40 มก./ล. ผลการทดลองดูจากตารางที่ 2.6

จากผลการทดลองนี้จะเห็นว่าระบบเอสบีอาร์แบบธรรมดาที่มีประสิทธิภาพในการลดสีรี แอกทีฟชนิดอะโซต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก และระบบเอสบี อาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกที่มีเวลาช่วงแอนแอโรบิกมากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย (ระหว่างความเข้มข้น 10 และ 40 มก./ล.)

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพการลดสีของชุดการทดลองที่มีระยะเวลาแอนแอโรบิกและความเข้มข้นต่างกัน
(Techovanich และคณะ, 2000)

		ประสิทธิภาพการลดสีหน่วย SU(%)	ประสิทธิภาพการลดสีหน่วย ADMI(%)
สี 10 มก./ล.	AS	18.1	19.4
	Ana2	37.3	41.3
	Ana4	62.9	59.5
สี 40 มก./ล.	AS	14.6	10.6
	Ana2	35.4	36.0
	Ana4	57.1	46.8

Luangdilok และ Panswad(2000) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสี ภายใต้สรีระแยกที่ฟที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน ด้วยแบบจำลองขนาดโต๊ะทดลองระบบเฮสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกที่มีเวลาวัฏจักรเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยมีเวลา แอนแอโรบิก+แอโรบิก เท่ากับ 18+5 ชั่วโมง และมีอายุสลัดจ์เท่ากับ 8 วัน การศึกษานี้ใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์ที่มีซีไอดีเท่ากับ 1,000 มก./ล. และสีที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้สรีระแยกที่ฟที่มีโครงสร้างต่างๆดังนี้

- สี (1) C.I. Reactive Black 5 มีโครงสร้าง Diazo Vinyl Sulphonyl
- สี (2) C.I. Reavtive Blue R มีโครงสร้าง Anthraquinone Visulsulphonyl
- สี (3) C.I. Reactive Blue CR มีโครงสร้าง Anthraquinone Monochlorotrizinyl
- สี (4) C.I. Reactive Blue H-EGN มีโครงสร้าง Oxazine

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมื่อความเข้มข้นสีต่างกันในแต่ละโครงสร้างสี โดยใช้ความเข้มข้นสีที่ 20 และ 100 มก./ล. ผลการศึกษาดูได้จากตารางที่ 2.7 และสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อความเข้มข้นของสี (1) ต่างกันจะเห็นว่าประสิทธิภาพการลดสีในหน่วย SU มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนในหน่วยของ ADMI จะมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะหน่วย ADMI เป็นการวัดสีที่คิดขึ้นมาเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสีที่มีปริมาณน้อยๆ (ประมาณ 300-500 ADMI) ดังนั้นเมื่อใช้หน่วยนี้วัดสีที่เข้มข้นมากอาจทำให้ได้ค่าวัดสีที่คลาดเคลื่อนได้ ส่วนสีที่มีโครงสร้างแอนทราควิโนนทั้งสองชนิด(สี(2) และสี(3)) เมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลง

ตารางที่ 2.7 ผลการลดสีของระบบที่มีโครงสร้างสีและความเข้มสีต่างกัน (Luangdilok และ Panswad, 2000)

		ความเข้มสี 20 มก./ล.				ความเข้มสี 100 มก./ล.			
		Inf	Ana	Aer	% rem	Inf	Ana	Aer	% rem
SU	สี(1)	97.3	37.4	36.5	63	435	176	172	58
	สี(2)	29.5	12.6	10.5	64	142	124	103	21
	สี(3)	43.4	14.1	14.8	66	214	190	188	15
	สี(4)	52.6	29.6	31.3	41	262	251	250	6
ADMI	สี(1)	1426	627	608	57	3075	-	-	31
	สี(2)	587	249	191	68	2126	-	-	18
	สี(3)	808	280	284	65	2537	-	-	12
	สี(4)	982	627	681	31	2669	-	-	0.2

อย่างเห็นได้ชัดเจน สำหรับสีที่มีโครงสร้าง Oxazine สี(4) พบว่าสีที่ปรากฏและเห็นด้วยตาในถึงปฏิกิริยาช่วงแอนแอโรบิกมีการลดของสีจนแทบจะไม่มีสี แต่เมื่อตักน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์กลับปรากฏว่ามีสีเข้มขึ้นมาอีกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถหาสาเหตุได้

- ผู้วิจัยกล่าวว่าจากการสังเกตกราฟแอมซอบแบนซ์ที่เกิดขึ้นจากการสแกนความเข้มสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร การลดของสี(1) จะมีการเปลี่ยนความยาวคลื่นเด่น (dominant wavelength) และมีการลดของค่าแอมซอบแบนซ์ลงด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดสีของสีอะโซจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างสี ส่วนสีที่มีโครงสร้างแอนทราควิโนนทั้งสองนั้นเมื่อมีการลดสีจะไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นเด่นแต่มีค่าแอมซอบแบนซ์ลดลง แสดงว่ามีการลดสีแต่ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างสี ซึ่งอาจกล่าวว่าการลดสีของสีแอนทราควิโนนน่าจะเกิดจากการดูดซับไว้บนฟล็อก ดังนั้นเมื่อความเข้มสีเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลงเพราะการจำกัดของการดูดซับสีของฟล็อก สำหรับสีออกซาซีนยังไม่สามารถสรุปกลไกหลักในการลดสีได้

- ผู้วิจัยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสี(1) ด้วยเทคนิคทาง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยสรุปว่าสีเปลี่ยนโครงสร้างในกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งทำให้เกิดการลดสี

- นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของไนเตรตและซัลเฟตที่มีผลต่อการลดสี โดยทำการทดลองแบบแบตช์ คือ (1.) ชุดควบคุม (ไม่มีการเติมไนเตรตและซัลเฟต) (2.) มีการเติมไนเตรต 10 มิลลิโมล

(3.) มีการเติมซัลเฟต 5 มิลลิโมล พบว่าชุดการทดลองที่มีการเติมไนเตรตทำให้อัตราการลดสีต่ำลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ส่วนชุดที่มีการเติมซัลเฟตมีอัตราการลดสีใกล้เคียงกับชุดควบคุม