

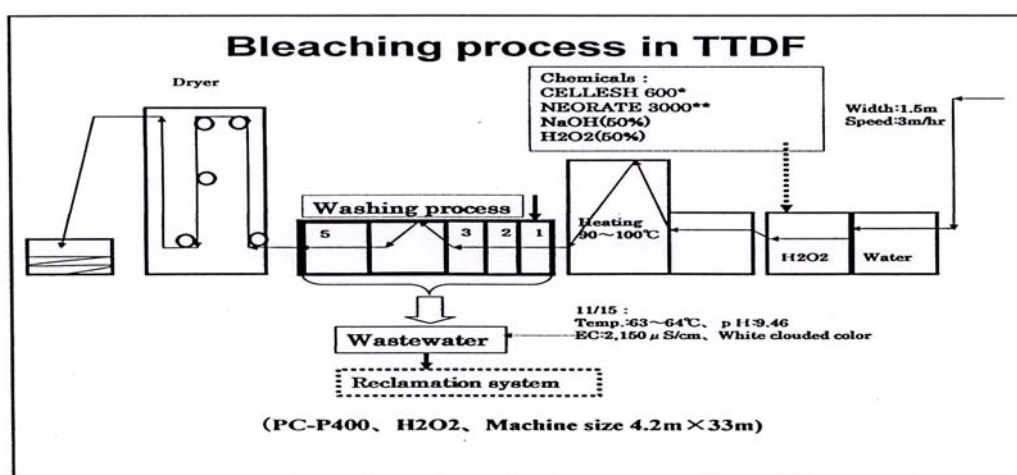
การตรวจเอกสาร

อุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอหมายถึงอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์โดยวิธีการถักทอเส้นใยต่างๆ ที่ที่ได้จากธรรมชาติและที่ได้จากเส้นใยประดิษฐ์ โครงสร้างของอุตสาหกรรมต่อเนื่องนับตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบคือ เส้นใยแล้วนำมาทำการปั่นด้าย ทอผ้า ถักผ้า จนถึงฟอกย้อมและแต่งให้สำเร็จให้พร้อมสำหรับการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป อุตสาหกรรมสิ่งทอเริ่มจากการผลิตเส้นใยแล้วนำมาปั่นเป็นเส้นด้าย นำมาทำเป็นผ้าผืนหรือเส้นด้ายมาเตรียมซึ่งก็คือการทำความสะอาดผ้าหรือเส้นด้ายนั่นเอง ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปย้อม พิมพ์ หรือทำขาว เมื่อเรียบเรียงแล้วจึงมาตกแต่งด้วยสารเคมีหรือโดยทางกลเพื่อให้เนื้อผ้ามีผิวสัมผัสหรือคุณสมบัติต่างๆตามความต้องการของลูกค้า

กระบวนการผลิตโรงงานฟอกย้อม

โรงงานฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประกอบด้วย การผลิตในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีบทบาทสำคัญที่สนับสนุนซึ่งกันและกัน จะทำการศึกษาพอสรุปได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตของโรงงานฟอกย้อมโดยสังเขป

ที่มา : เอกสารประกอบการสัมมนาบริษัท WRPC (water reuse promotion center), 2005.

ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ดังนั้นน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการจึงปริมาณสูง ในกระบวนการมีการใช้สีย้อมและสารเคมีอื่นๆ หลากหลาย ซึ่งสารเคมีจะไม่ติดไปกับผลิตภัณฑ์สิ่งทอทั้งหมด แต่จะหลุดออกมากับน้ำที่ออกจากกระบวนการ เพราะปฏิกิริยาที่จำเป็นในการนำสารเหล่านี้ลงไปในเนื้อผ้าโดยปกติไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมจึงประกอบไปด้วยสารเคมีหลากหลายชนิด นอกจากนี้ลักษณะของโรงงานฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตค่อนข้างเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้น้ำทิ้งนอกจากจะมีความหลากหลายแล้ว ยังมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการผลิตที่ใช้อีกด้วย แต่โดยทั่วไปแล้วลักษณะเด่นของน้ำทิ้งฟอกย้อมคือ มีสีเข้มและสีหลากหลาย มีปริมาณซึ่งสัดส่วนของ COD:BOD มีค่าความแตกต่างไม่มากระหว่าง 2-4 :1 แสดงว่าน้ำเสียจากสิ่งทอนี้พอจะนำไปบำบัดได้ด้วยวิธีทางชีววิทยาได้ง่าย ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณความเป็นด่าง และอุณหภูมิสูง และอาจมีสารเคมีอันตรายบางชนิดเช่น ฟีนอลและโลหะหนักด้วย

ปัญหาสีย้อมปนเปื้อนจากโรงงานฟอกย้อม

1. สีย้อม

1.1 องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม (ปวีณา, 2539) โมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

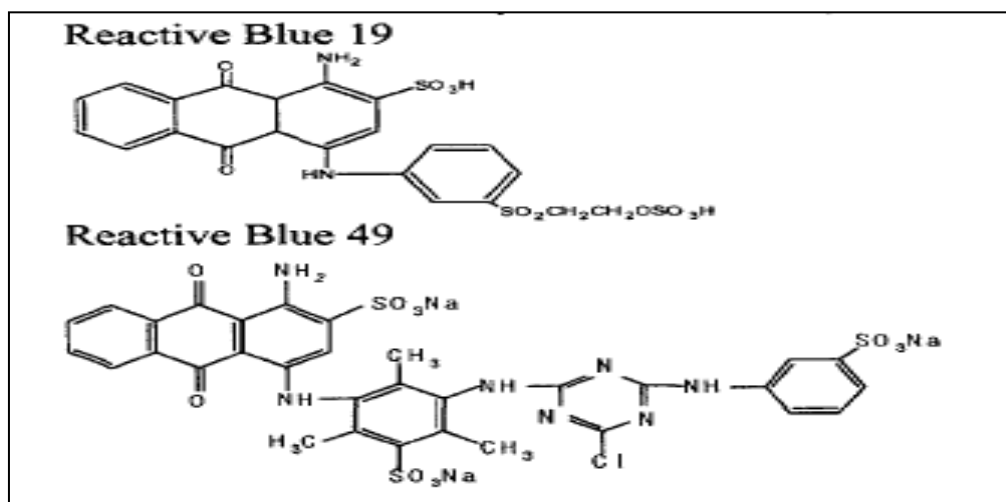
1.1.1 Dye chromophore องค์ประกอบส่วนนี้ จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงกระทบ โครงสร้างโครโมฟอร์จะเกิดการสั่น (Oscillates) เนื่องจากการดูดกลืน (Absorb) แสงบางความยาวคลื่นไปเป็นผลให้เกิดการเห็นสีตามช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 12 กลุ่ม ในจำนวนนี้ที่นิยมใช้กัน ได้แก่กลุ่มเอโซ (Azo Group) กลุ่มแอนทราควิโนน (Anthraquinone Group) กลุ่มเบนโซดิฟูแรน (Benzodifuranone Group) กลุ่มอินดิโก (Indigo Group) และกลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group) โดยเฉพาะกลุ่มเอโซนิยมใช้กันมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์

1.1.2 Dye Functional Group องค์ประกอบส่วนนี้ จะมีส่วนในการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใยทำให้เกิดการยึดติดกันขึ้น โดยโครงสร้างส่วนนี้จะประกอบไปด้วย วงเบนซีน (Benzene ring) ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Group) ติดอยู่ซึ่งได้แสดงตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟบลูไว้ในภาพที่ 2 ซึ่งได้แก่ $-\text{SO}_3$, $-\text{NR}_2$, $-\text{NHR}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$ และ $-\text{COOH}$ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1 โมเลกุลสีจะยึดติดกับเส้นใยได้โดยการที่กลุ่มฟังก์ชัน (Functional Group) เหล่านี้ทำปฏิกิริยากับเส้นใย โดยเกิดพันธะโควาเลนต์ พันธะไอออนิก แรงวันเดอร์วาลส์หรือโดยการซึมซับเอาอนุภาคคอลลอยด์ของโมเลกุลสีเข้าไปในเส้นใย

ตารางที่ 1 การเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใยทำให้เกิดการยึดติดกันได้โดยการที่กลุ่ม Functional Group เหล่านี้ทำปฏิกิริยากับเส้นใย

โครงสร้าง Functional Group	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดสีที่มีโครงสร้าง
	Mono Fluorotriazine	- RB 184 (Navy Blue) - RB 204 (Bright Blue) - RB 182 (Blue)
	Dichlorotriazine	- RB 4 (Bright Blue) -RB 140 (Bright Greenish Blue) -RB 163 (Greenish Blue)
$-\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{H}$	Vinylsulphone	- RB 19 (Bright Blue)

ที่มา : Shore (1995) and Hunger (2003)



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีสีรีแอคทีฟ บลูที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน

ที่มา : Kim *et al.* and Desalination (2004). : 287-293.

1.2 การจำแนกประเภทสีย้อม สามารถจำแนกประเภทของสีย้อมได้ดังนี้

1.2.1 จำแนกตามวิธีใช้แบ่งได้เป็น 11 ประเภท คือ (1) สีแอซิด (2) สีอะโซอิก (3) สีเบสิก (4) สีไดเรกต์ (5) สีดิสเพิร์ส (6) สีอินเกรน (7) สีมอร์แดนต์ (8) สีออกซิเดชัน (9) รีแอคทีฟ (10) สีซัลเฟอร์ (11) สีแวต สีย้อมแต่ละประเภทมีสูตรโครงสร้างทางเคมี วิธีการใช้สมบัติที่แตกต่างกัน และใช้สำหรับการย้อมเส้นใยต่างชนิดกันซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2

1.2.2 การจำแนกสีอาจจะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สีชนิดที่ละลายน้ำได้ และสีชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้

- ก. สีชนิดที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ สีเอซิก ,สีเบสิก ,สีไดเรกต์และสีรีแอคทีฟ
- ข. สีชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้ ได้แก่ สีอะโซ , สีดิสเพิร์ส, สีแวต, สีฟิคเมนต์, สีซัลเฟอร์และสีเมทัลคอมเพลกซ์

ตารางที่ 2 การจำแนกประเภทของสีย้อมตามวิธีการใช้

ประเภทสี	สมบัติกายภาพ และสมบัติเคมี	พันธะหรือ กลไกการติดสี	เส้นใยที่สีย้อม	วิธีใช้
1. สีแอซิด	: ประจุลบ : ละลายน้ำดี : สีติดไม่แน่น	: พันธะไอออนิก	ไนลอน ไชขน แกะไหม	ใช้ย้อมในน้ำย้อมที่เป็น กรดหรือเป็นกลาง
2. สีอะโซอิก	: เป็นคอลลอยด์ หลังจาก เกิดปฏิกิริยาใน น้ำ : ไม่ละลายน้ำ : สีติดแน่น	: ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	ฝ้าย เรยอน	ต้องย้อมด้วย “coupling component” ก่อน แล้ว ย้อมทับด้วย “diazo component” เพื่อให้ มันทำปฏิกิริยากันเกิด เป็นสีย้อมขึ้นภายใน วัสดุที่ย้อม
3. สีเบสิก	: ประจุบวก : ละลายน้ำดี	: พันธะไอออนิก	อะโครลิกไหม ไชขนแกะ	ใช้ย้อมในน้ำย้อมที่เป็น กรด
4. สีไดเรคท์	: ประจุลบ : ละลายน้ำดี : สีติดไม่แน่น	: พันธะไอออนิก	ฝ้าย เรยอน	ใช้ย้อมในน้ำย้อมที่เป็น กลางหรือเป็นด่างอย่าง อ่อน โดยจะต้องมีการ ใส่สารอิเล็กโตรไลต์ลง ไปในน้ำย้อมด้วย
5. สีอินเกรน	: เป็นคอลลอยด์ หลังจาก เกิดปฏิกิริยาใน น้ำ : ไม่ละลายน้ำ : สีติดแน่น	: ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	ฝ้าย	ใช้ย้อมเข้าไปในวัสดุ แล้วจึงทำปฏิกิริยาเกิด เป็นสารมีสีขึ้นภายหลัง

ที่มา : กาญจน (2536) และ ก้องเกียรติ (2543)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ประเภทสี	สมบัติกายภาพ และสมบัติเคมี	พันธะหรือ กลไกการติดสี	เส้นใยที่ใช้ย้อม	วิธีใช้
6. สีดิสเพิร์ส	: ไม่ละลายน้ำหรือ ละลายน้ำได้น้อย มาก : กระจายอยู่ในน้ำ เป็นอนุภาค คอลลอยด์คืดแน่น	: คอลลอยด์ของ สีย้อมดูดติดผิว กับเส้นใย	โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะซิ เตท โพลีโพรพิ ลีน อะไครลิก เซลลูโลสอะซิ เตท	เป็นสีที่อยู่ในน้ำย้อม ในอุณหภูมิไม่เกิน 100°C โดยใช้แครี เออร์
7. สีมอร์ แดนทหรือ โครม	: ประจุลบ : ละลายน้ำได้ : สีติดแน่น	: พันธะเชิงซ้อน ของเส้นใยโครม และสีย้อม	ใยขนแกะ ขนสัตว์	ใช้ย้อมคู่กับเกลือของ โลหะโดยเฉพาะ โลหะโครเมียม
8. สี ออกซิเดชัน	: เป็นคอลลอยด์ หลังจาก เกิดปฏิกิริยาในน้ำ : ไม่ละลายน้ำ : สีติดแน่น	: ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	ฝ้าย ขนสัตว์	ใช้ย้อมเข้าไปในวัสดุ แล้วจึงทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันเกิดเป็น สารมีสีขึ้นในภายหลัง
9. สีรีแอกทีฟ	: ประจุลบ : ละลายน้ำดี : สีติดแน่นดี	: พันธะโควา เลนต์	ฝ้าย เรยอน ใยขนแกะ ไหม ไนลอน	เห็นสีที่ทำปฏิกิริยา เกิดพันธะทางเคมีกับ วัสดุที่ย้อมในน้ำย้อม ที่แตกต่าง
10. สีซัลเฟอร์	: เป็นคอลลอยด์ หลังจาก เกิดปฏิกิริยาในน้ำ : ไม่ละลายน้ำ : สีติดแน่น	: ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	ฝ้าย เรยอน	ใช้ย้อมในน้ำย้อมที่ ประกอบด้วยโซเดียม ซัลไฟด์และด่างเมื่อ ย้อมเข้าไปในเส้นใย แล้วจึงทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันให้ กลับไปอยู่ในรูปเดิม

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ประเภทสี	สมบัติกายภาพ และสมบัติเคมี	พันธะหรือ กลไกการติดสี	เส้นใยที่ใช้ย้อม	วิธีใช้
11. สีแฉะ	: เป็นคอลลอยด์ หลังจาก เกิดปฏิกิริยาในน้ำ : ไม่ละลายน้ำ : สีติดแน่น	: ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	ฝ้าย เรยอน	ใช้ย้อมในน้ำย้อมที่ ประกอบด้วยโซเดียม ไฮโดรซัลไฟต์แล้วจึง ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ให้กลับไปอยู่ในรูปเดิม

1.3 จำแนกตามสูตรโครงสร้างทางเคมี (ธงชัย และ กาญจนา, 2535)

สีย้อมที่ขายในท้องตลาดปัจจุบัน มีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงสร้างหลักอยู่ถึงกว่า 30 ชนิด แต่โครงสร้างหลักที่มีปริมาณการใช้มากจริง ๆ มีอยู่ไม่ถึง 10 ชนิดที่สำคัญ ได้แก่

1.3.1 สีย้อมเอโซ (Azo Dyes) คือสีย้อมที่มีกลุ่มเอโซ อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงกว่า 50% ของสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด คุณลักษณะที่สำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้คือ มีสีให้เลือกครบทุกเฉด แต่โดยทั่ว ๆ ไป จะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี ราคาไม่แพง

1.3.2 สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dyes) เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ขึ้นได้โดยอาศัยแอนทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีความสำคัญเป็นลำดับ 2 รองจากสีเอโซ โดยครอบคลุมประมาณ 25% ของสีย้อมทั้งหมด สีแอนทราควิโนนเป็นสีที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงของสีม่วง สีฟ้า สีเขียว และสีแดงสด เป็นสีที่มีความสว่างสดใสดี และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มของสีสู้สีเอโซไม่ได้ และมีราคาแพงกว่าด้วย

1.3.3 สีย้อมไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane Dyes) สีกลุ่มนี้ให้สีม่วง สีฟ้า และสีเขียวที่มีความสว่างสดใสมาก แต่สมบัติในด้านความคงทนต่อแสงไม่ดีนัก

1.3.4 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes) คือ สีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีย้อมนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุด ในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากมีราคาถูก นิยมใช้ย้อมสีทึบ ๆ ที่ต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ สีน้ำตาล สีน้ำเงิน เป็นต้น สีย้อมนี้มีสีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีทึบไม่สดใส

1.3.5 สีย้อมอินดิโกอยด์ (Indigoid Dyes) คือสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของอินดิโกอยู่ในโมเลกุล สีย้อมนี้มีความสำคัญ เพราะมีสีอินดิโกซึ่งเป็นสีย้อมที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดถ้านับเป็นการเฉพาะตัว

ชนิดของสีย้อมที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

สีที่ใช้ย้อมสิ่งทอตามลักษณะทางกายภาพแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำ เรียกว่า พิกเมนต์ (Pigments) น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีราคาถูกที่สุด ดังนั้นแม้ว่าสีบางตัวไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสารอื่นทางโรงงานผู้ผลิตจะต้องพยายามค้นคว้าหาวิธีทำให้สีตัวนั้นละลายในน้ำให้ได้ ใช้ตัวทำละลายอื่นให้น้อยที่สุด สีเมื่อละลายน้ำแล้วจะซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้ดีพอสมควร ทนซักและขบวนการใช้น้ำอื่นๆ บางตัวจะมีพันธะ (Bond) หรือ โซ่ (Linkage) เชื่อมโยงอยู่ระหว่างเส้นใยกับตัวสีทำให้ติดทนนานยิ่งขึ้น สีบางตัวจะติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) แต่ขณะเดียวกันก็หลุดออกมาได้ง่าย

ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมได้เพียงบางส่วนที่เหลือยังคงอยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยรวมมาทิ้งในที่สุด ปริมาณสีที่ยังเหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อม ซึ่งสีย้อมที่จะกล่าวถึงคือสีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dye) มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีดัดแน่นดี มีกลไกการติดสีในเนื้อผ้าเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้สีรีแอกทีฟเป็นสีชนิดที่ย่อยสลายได้ยากที่สุด (ประรัชกรณ์, 2546) สีย้อมผ้าชนิดรีแอกทีฟเป็นพารามิเตอร์หลักที่ประสบปัญหาในงานบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม กล่าวคือในปัจจุบันสีย้อมส่วนใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้มีความคงทนสูงอีกทั้งยังเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ประเภทสารอะโรมาติกที่มีโครงสร้างเคมีที่ซับซ้อนยากต่อการย่อยสลาย (McCurdy *et.al.*, 1992) ซึ่งจะไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีววิทยา (Non-Biologically degradable) ดังนั้นจึงไม่ถูกกำจัดโดยกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาที่ใช้อยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำที่ผ่านออกจากระบบบำบัดดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงอยู่จึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบบำบัดให้มี

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีออกจากน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสีหลายกระบวนการ แต่เป็นการยากที่จะพิจารณาว่าจะใช้วิธีใดในการบำบัดจึงจะเหมาะสม ทั้งนี้เพราะน้ำทิ้งแต่ละโรงงานต่างก็มีลักษณะเฉพาะตัว จำเป็นต้องอาศัยการพิจารณาอย่างละเอียด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ข้อดี – ข้อเสีย และค่าใช้จ่ายในการบำบัดของแต่ละวิธีที่จะเลือกใช้

การบำบัดน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อม

สิ่งที่มีการเจือปนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมซึ่งสีย้อมส่วนใหญ่จะเป็นสีสังเคราะห์จากสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน(Synthetic Complex Organic Dyes) สารเคมีที่เป็นสารพิษและสิ่งสกปรกซึ่งส่วนที่ยังเหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำทิ้งตามธรรมชาติซึ่งแบ่งได้ดังนี้คือ

1. การบำบัดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical Treatment)

1.1 เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเมมเบรน (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสีและยังสามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ เทคนิคนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้ (ขวลิต, 2547)

1.1.1 ไมโครฟิเตรชัน (Microfiltration, MF)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสีประเภทดิสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์และสีย้อมประเภทสียัลเฟอว์, สีแวต และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยคอตตอน (Cotton) และวิสคอส (Viscose) สีย้อมประเภทสียัลเฟอว์สเมื่อผ่านกระบวนการ Microfiltration แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งน้ำทิ้งหลังจากผ่านกระบวนการ Microfiltration ต้องผ่านการบำบัดก่อนที่จะปล่อยทิ้งไป โดยจำเป็นต้องมีการกำจัดผงโดยการทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมีและมีการปรับพีเอชของน้ำทิ้ง

1.2 อัลตราฟิเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ประกอบด้วยคอลลอยด์และสารน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปสารที่ไม่มีประจุจะถูกกั้นไว้และไอออนจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้โดยขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของสารที่มีน้ำหนักมากกว่าจะถูกกักเอาไว้ด้วยเมมเบรน การทำงานของอัลตราฟิเตรชันเป็นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน (Pore Size) ประมาณ 10 อังสตรอมถึง 0.1 ไมครอน ใช้ความดันสูงถึง 100-200 ปิเอสไอ (psi) มักนิยมใช้ในการแยกโปรตีนและใช้ผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์โดยใช้ร่วมกับวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange)

1.3 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับใช้กำจัดไอออนสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะเป็นเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิสที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และขั้นตอนที่สองจะเป็นเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิสที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งในขั้นตอนแรกจะสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังขั้นตอนที่สองและสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 สีย้อมที่สีย้อมเส้นใยประเภทคอตตอน ไม่สามารถใช้ในกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสได้

1.4 นาโนฟิเตรชัน (Nanofiltration, NF)

เป็นกระบวนการกำจัดสีย้อมประเภทรีแอคทีฟที่สีย้อมเส้นใยพวกคอตตอน (Cotton) เนื่องจากการย้อมสีย้อมประเภทรีแอคทีฟจะต้องใช้สารอิเล็กโตรไลต์เพื่อช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กระบวนการนาโนฟิเตรชันจะสามารถแยกสารพวกอิเล็กโตรไลต์เหล่านี้ส่วนนำกลับมาใช้ได้

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการกำจัดสีย้อมโดยใช้เมมเบรนนี้ จะเป็นการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมกันอย่างหนาแน่นบนด้านหนึ่งของเยื่อแผ่น ในขณะที่น้ำจะผ่านทะลุเยื่อแผ่นไปได้ ซึ่งสามารถแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ ไม่เพียงเฉพาะโมเลกุลสีย้อมเท่านั้น เทคนิคนี้สามารถใช้บำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากได้รวดเร็วแต่ต้นทุนของอุปกรณ์มีราคาสูงและถ้าความเข้มข้นของสีในน้ำทิ้งมีมากจะมีการตกค้างของสีในน้ำทิ้ง ดังนั้นเทคโนโลยีด้านเยื่อแผ่นจึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก

2. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านทำได้ยาก ต้นทุนในการนำถ่านกลับมาใช้ซ้ำอีกจึงสูงมากและต้องผ่านการเผาและการกำจัดกาก รวมไปถึงการปรับพีเอชของน้ำทั้งก่อนปล่อยออกไปยังแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายสูง ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้ในต้นทุนที่ต่ำกว่าปัจจุบันและมีพื้นที่ผิวมากกว่าที่เป็นอยู่ วิธีนี้อาจมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์สูง

3. การบำบัดโดยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment)

3.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

โคมล (2541) กล่าวไว้ว่า เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกำจัดสีโดยใช้สารเคมีเช่น ปูนขาว สารส้ม เฟอร์ริกคลอไรด์เติมลงในน้ำเสียสีเพื่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคจนเกิดเป็นฟล็อก แล้วตามด้วยการตกตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้น ซึ่งสีจะถูกจับรวมอยู่ในฟล็อกด้วยจึงทำให้เกิดการลดสีได้ แต่วิธีนี้จะต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการกำจัดสี สลัดจ์ที่เกิดขึ้นก็มีปริมาณมากด้วย ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ส่วนเกินนี้ต่อไปและที่สำคัญคือ วิธีนี้ใช้ได้กับสีที่ไม่ละลายน้ำดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะบำบัดสีที่ละลายน้ำได้ตัวอย่างเช่นสีรีแอกทีฟ

3.2 การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation and Reduction)

การออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมี เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มที่ทำให้เกิดสี คือ กลุ่มโครโมฟอร์ไปอยู่ในอีกรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสี สารเคมีที่ใช้ในการทำออกซิเดชัน-รีดักชันจะเลือกจากศักยภาพในการออกซิไดซ์ทางเคมี (Chemical Oxidation Potential) และศักยภาพในการรีดิวซ์ทางเคมี (Chemical Reduction Potential) ซึ่งเป็นตัวชี้ถึงความสามารถในการออกซิเดชัน

การออกซิไดซ์ด้วยสารเคมีที่มีศักยภาพในการออกซิเดชัน-รีดักชัน นอกจากจะลดปริมาณสีแล้ว ยังอาจลดสิ่งปนเปื้อนอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำทิ้งได้อีกด้วย นอกจากนี้การออกซิไดซ์ด้วย

โอโซนก็เป็นเทคนิคอีกอย่างหนึ่งในการออกซิไดซ์ที่แรงมาก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โมเลกุลสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นสารประกอบด้วยสารไนโตรเจน (Nitrogen) คลอรีน (Chlorine) หรือซัลเฟอร์ (Sulphur) จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม ข้อดีของเทคนิคนี้คือสามารถใช้กับน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากและสามารถค่าสีโอดีของน้ำทิ้งได้ ข้อเสียของเทคนิคนี้คือราคาต้นทุนของอุปกรณ์จะสูง

4. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

4.1 ระบบบำบัดแบบแอคติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge, AS)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาซึ่งอาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวลดความสกปรกของน้ำ โดยทั่วไปการใช้งานของระบบบำบัดชนิดนี้กับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้งนี้เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสีย้อมเป็นส่วนสำคัญ การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีววิทยาอาจไม่เพียงพอสำหรับการลดสีย้อมได้จึงต้องทำการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นมาช่วยในการลดสีและตะกอนแขวนลอยด้วย ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวตเต็ดสลัดจ์ เป็นระบบบำบัดที่นิยมใช้ทั่วไปในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าระบบบำบัดแบบนี้ไม่สามารถบำบัดสีย้อมและตะกอนแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการเลือกระบบบำบัดที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้แทนระบบบำบัดที่มีอยู่เดิม

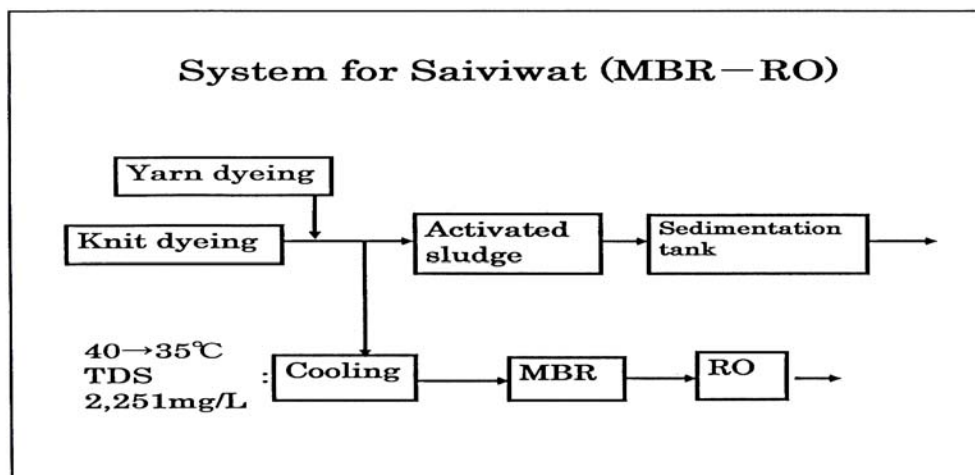
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ของโรงงานฟอกย้อมสายวิวัฒน์
กรุงเทพฯ

	Temp (°C)	pH (-)	EC (μ S/cm)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Color (Pt-Co)	Cl ⁻ (mg/l)	TDS (mg/l)
น้ำเสียเข้า ระบบบำบัด	44.9	9.2	3,640	148	300	30.9	239	677	2,250
น้ำเสียออกจาก ระบบบำบัด	37.2	8.01	4860	35.7	149	37.3	305	933	-

ที่มา : เอกสารประกอบการสัมมนาบริษัท WRPC (water reuse promotion center), 2005

4.2 ถึงปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัว (Submerged Membrane Bioreactor, MBR)

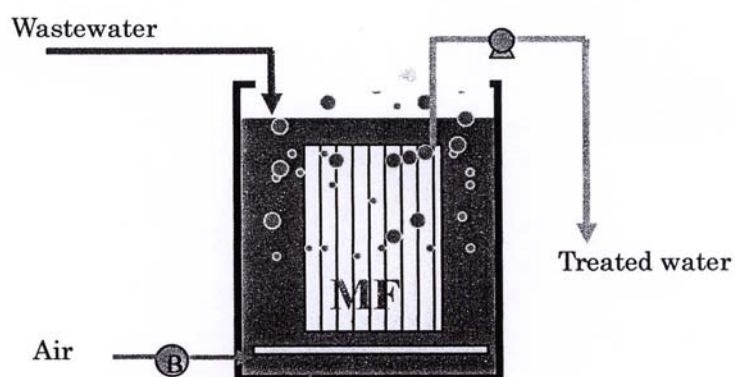
ถึงปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัว (Submerged Membrane Bioreactor) เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์โดยการใช้เอีกรองจุ่มลงไปใต้น้ำเสียภายในถังปฏิกิริยาเพื่อแยกน้ำออกจากอนุภาคของแข็งโดยสามารถกรองสารแขวนลอยที่อยู่ในระบบได้โดยตรงซึ่งสามารถใช้งานแทนถังตกตะกอนได้ทำให้ประหยัดพื้นที่ (Cho ,1999) และยังสามารถกักจุลินทรีย์ที่จำเป็นในการย่อยสลายไว้ในถังปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นรับภาระสารอินทรีย์ได้สูงขึ้นอีกด้วย (Takemura ,1999) ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างระบบที่มีการใช้ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนจมตัวร่วมกับการใช้เมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงหรือประยุกต์ใช้ระบบบำบัดที่เหมาะสมในอนาคต อีกทั้งยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย (ชวลิต, 2547) กล่าวไว้ว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการใส่เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันติดตั้งจมตัวในถังปฏิกรณ์ของระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายประการเช่น คุณภาพน้ำที่ผลิตได้ดีขึ้น, ต้องการพื้นที่น้อย, มีตะกอนที่ต้องทิ้งน้อยกว่า, ลดปัญหาเรื่องกลิ่นและการใช้สารเคมี



ภาพที่ 3 ระบบถังปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัวและกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานฟอกย้อมสาขาวีวัฒน์

ที่มา : เอกสารประกอบการสัมมนาบริษัท WRPC (Water Reuse Promotion Center), 2005

ปัจจุบันนี้เริ่มมีความสนใจในการใช้กระบวนการใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีเยื่อกรองจมตัวในการปรับปรุงคุณภาพน้ำแทนกระบวนการบำบัดแบบธรรมดาทั่วไป เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นซึ่งรูปแบบของถังปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัว(Submerged Membrane Bioreactor, MBR) ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ถังปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัว(Submerged Membrane Bioreactor, MBR)

ที่มา : เอกสารประกอบการสัมมนาบริษัท WRPC (Water Reuse Promotion Center), 2005

แต่ข้อจำกัดของถังปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัวซึ่งมีการใช้แบคทีเรียประเภทใช้อากาศ (Aerobic Bacteria) ก็คือยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดสีย้อม เนื่องมาจากแบคทีเรียประเภทใช้อากาศที่อยู่ในถังปฏิกรณ์นี้ไม่มีความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนของสีย้อมที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมได้ เนื่องจากกระบวนการแอโรบิกไม่สามารถลดสีเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและการกำจัดสีด้วยกระบวนการของแบคทีเรียที่ใช้อากาศนี้จะเกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับเป็นหลัก (Michal *et.al.*, 1978) (โกมล, 2541) พบว่าการบำบัดสีย้อมโดยระบบบำบัดทางชีวภาพทั่วไป เช่น ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ จะใช้แบคทีเรียที่ใช้อากาศ (Aerobic Bacteria) มีความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมได้น้อย ซึ่งกลไกในการบำบัดสีย้อมที่เกิดขึ้นโดยการดูดซับสีเข้าไปในตัวแบคทีเรียใช้อากาศมากกว่าเกิดกลไกการออกซิเดชัน มีแบคทีเรียที่ไม่ได้ใช้อากาศบางชนิดสามารถย่อยสลายสีย้อมได้จากปฏิกิริยาอะโซรีดักเทส (Azoreductase) ซึ่งเป็นการลดสีอะโซ (Azo) ได้โดยไม่มีการปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อย แต่แบคทีเรียไร้อากาศ (Anaerobic Bacteria) เมื่อมีการบำบัดสีแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารพิษ เนื่องจากการย่อยสลายโดยแบคทีเรียไร้อากาศได้ผลิตออกซิเจนซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นโดยแบคทีเรียที่ใช้ในระบบบำบัดทั่วไป

ดังนั้นจึงต้องมีการหาวิธีในการปรับปรุงให้ถังปฏิกรณ์นี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ซึ่งทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนั้นคือการนำเชื้อราเข้ามาใช้ในการลดความเข้มของสีย้อมจากกระบวนการผลิต อันเนื่องมาจากน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการย้อมผ้าประกอบด้วยสิ่งสกปรกและสีที่มีความเข้มสูงเนื่องจากสีย้อม (Dyes) และสารช่วยย้อมซึ่งเหลือจากการย้อมไม่ติดกับเนื้อผ้า (ประมาณ 5-35%) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีในการย้อม ซึ่งสีย้อมเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเป็นโครงสร้างหลัก (Backbone) ส่วนสารอนินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีส่วนมากจะเป็นสารสี และมีโครงสร้างที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกที่ซับซ้อนยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดแบบชีวภาพที่นิยมใช้ทั่วไป (Subramanyan *et.al.*, 1972) ดังนั้นจึงมีผู้ที่ทำการศึกษาลำดับมีชีวิตจำพวกเชื้อรา ซึ่งมีกลไกการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและการดูดซับสีด้วย โดยสิ่งมีชีวิตจำพวกเชื้อรา ซึ่งช่วยในการลดความเข้มของสีย้อม (Driessel and Christov, 2001) การเลือกใช้เมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันทำงานโดยใช้แรงขับเคลื่อนที่ต่ำและมีอัตราการผลิตน้ำ (Permeate Flux) มากกว่าเมมเบรนชนิดอื่นๆ ที่ความดันเดียวกัน โดยสามารถกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ได้แก่ อนุภาคแขวนลอยที่มีขนาด 0.01-10 ไมครอน ซึ่งส่วนมากเป็นอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (ขนาด 0.05-10 ไมครอน)

(Parameshwaran, 1997) รวมทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ เชื้อราและปรสิตอื่นแต่ไม่สามารถกักแยกไอออนหรือสารละลายได้

4.3 การใช้เชื้อราในการลดความเข้มข้นของสี

ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เชื้อรามาใช้ในกระบวนการลดความเข้มข้นของสีจากที่ Kim *et al.*, 2004 ได้ทำการวิจัยโดยการนำเชื้อราขาวชนิด *Trametes versicolor* KCTC 16781 ทำการเลี้ยงเชื้อราในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรน ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดสีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรน ที่ทำการเลือกเชื้อราขาวมาใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากเชื้อราขาว จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation) ได้ดีกับสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนเป็นสารประกอบที่ย่อยสลายได้ยากหากใช้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดทั่วไป ตัวอย่างเช่น สีข้อมเป็นสารประกอบที่ย่อยสลายได้ยากเนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งยากต่อการย่อยสลาย มีรายงานเกี่ยวกับเรื่องเชื้อราออกมาว่าเชื้อรามีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ขึ้นมา 3 ชนิดซึ่งช่วยในการลดความเข้มข้นของสีข้อมได้ประกอบไปด้วยแลคเคส (Laccase), ลิกกินินเปอร์ออกซิเดส (Lignin Peroxidase, LiP) และ แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (Manganese Peroxidase, MnP) ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการวิจัยครั้งอื่นพบว่าเชื้อราแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ได้อาจจะได้เพียงตัวเดียวสองตัวหรือสามตัว (Ha *et al.*, 2001)

(Karapinar *et. al.*, 1999) สารประกอบลิกกินินที่อยู่ในสีข้อมสามารถย่อยสลายได้โดยการใช้เชื้อราขาว ในสปีชีส์ *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor* และ *Coriarius Versicolor* โดยจะมีการผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกกินินและสามารถฟอกสีได้ ซึ่งเชื้อราขาวจะมีกลไกในการบำบัดสีข้อมได้ด้วยกลไกการปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายสีข้อม ซึ่งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยลิกกินินเปอร์ออกซิเดส (LiP), แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (MnP) และ แลคเคส (Laccase) เชื้อราขาวมีข้อได้เปรียบในการย่อยสารประกอบที่ย่อยสลายยาก โดยสามารถย่อยสลายสเปก.ที่มีความหลากหลายและมีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน เช่น สารประกอบพวกอโรมาติกที่เป็นมลพิษโดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เกิดกลไกโดยการปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ ซึ่งสารอาหารจะถูกใช้ในกระบวนการสร้างเอนไซม์ของเชื้อรา สารอาหารจะถูกแพร่กระจายเข้าไปในเซลล์ ซึ่งการขับเอนไซม์ออกมาจากเชื้อราขาวจะขึ้นอยู่กับสารอาหารที่เข้าไปในตัวเชื้อรา เช่น คาร์บอนหรือไนโตรเจน ซึ่งกระบวนการกลไกในการขับเอนไซม์ของเชื้อราขาวมีความสามารถในการ

การรับภาระความเข้มข้นของสารพิษได้ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ต้องทำให้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อเอชเท่ากับ 4.5 จะทำให้เกิดกิจกรรมการผลิตเอนไซม์ของเชื้อรา

กลไกหลักในการบำบัดสีย้อม

กลไกการลดความเข้มสีย้อมมี 2 กลไกหลักคือ

1. กลไกการดูดซับ (Biosorp)

กลไกการดูดซับสีจากรายงานการศึกษากลไก การดูดซับสีเชื้อราเข้ามาในเยื่อหุ้มเซลล์และมีบางส่วนถูกดูดซับภายในไซโตพลาสซึมพบว่าดูดซับสีไว้ที่ผิวเซลล์และบางส่วนจะถูกสะสมภายในเซลล์ เนื่องจากชนิดของประจุบนเส้นใยของรามิผลต่อการดูดซับสีได้ สีย้อมการดูดซับสีย้อมของเส้นใยราเกิดจากการดูดซับเนื่องจากความแตกต่าง (Sirianuntapiboon *et al.*, 1990)

2. กลไกการถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ภายในเซลล์ (Biodegradation)

การผลิตเอนไซม์ (Enzyme) มีทั้งที่เป็นเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายในเซลล์ (Intracellular) และเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme)

2.1 เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายในเซลล์ (Intracellular) - กลุ่มของเอนไซม์ที่เกิดปฏิกิริยาได้โดยขึ้นกับน้ำตาล (Sugar Dependent) กลุ่มของเอนไซม์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาได้โดยขึ้นกับน้ำตาล (Sugar Independent)

2.2 เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ได้แก่ เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ดีด้วยเอกติเวตเตดคาร์บอนแต่มีราคาแพง ดังนั้นควรจะหาวิธีใหม่ๆ ที่คุ้มค่าต่อเศรษฐศาสตร์จ่ายต่อการดำเนินระบบและมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับจะมุ่งเน้นศึกษาสิ่งมีชีวิตทางชีววิทยาบางชนิดที่มีความสามารถ

ในการย่อยสลายทางชีวภาพและเกิดการดูดซับสีข้อมได้จากกลไกการการลดสีข้อมของเชื้อราสามารถจำแนกชนิดเซลล์เชื้อราได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. เชื้อราที่มีชีวิต (Living Cell)

เป็นส่วนหนึ่งของกลไกการบำบัดสีซึ่งจะเกิดกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพเพราะเซลล์เชื้อราที่มีชีวิตอยู่ในถังปฏิกรณ์สามารถผลิตเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสีข้อมได้ ประกอบด้วยเอนไซม์ 3 ชนิด คือ MnP, Laccase, LiP ซึ่งความสัมพันธ์ของเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิดมีส่วนช่วยในการย่อยสลายทางชีวภาพของสีข้อมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อรา Oliikka *et.al.* (1993) รายงานถึงเอนไซม์ LiP ทำหน้าที่ในการลดความเข้มสีข้อมชนิด Azo, Triphenyl Methane, Heterocyclic และ Polymeric Dyes โดยเชื้อราขาว *P.chrysosporium* และ Mn ไม่สามารถย่อยสลายสีประเภทนี้ได้แต่ทำหน้าที่สำคัญในการลดสีของน้ำที่ออกจากกระบวนการฟอกสีเส้นใย cotton ในขณะที่ LiP ทำหน้าที่สำคัญในการลดความเข้มสีข้อมที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีกลไกลดความเข้มสีชนิดแอนทราควินอนอโซ (Anthraquinone Azo) และสีข้อมอินดิโก (Indigo)

2. เซลล์เชื้อราที่ตาย (Dead Cell)

เกิดกลไกการบำบัดโดยการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) ซึ่งเกิดกระบวนการกายภาพ-เคมีอย่างสมบูรณ์ตัวอย่างเช่น กระบวนการดูดซับ, กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน, กระบวนการตกตะกอน เป็นต้น Gallagher *et al.* (1997) กล่าวว่า *Rhizopus Oryzae* Biomass ในกระบวนการดูดซับสี ดูดซับสีรีแอทีฟ ชนิด Brilliant Red ในรูปที่เป็นสารละลายและใช้โมเดลการดูดซับโดยใช้กฎของ Freundlich และ Langmuir isotherm พบว่าเกิดกระบวนการดูดซับโดยเชื้อราจากการศึกษาที่มีความเป็นไปได้ว่าหน้าที่สำคัญในการดูดซับสีข้อมเกิดขึ้นภายในเซลล์ Brahimi-Horn *et al.* (1992) ได้ทำการศึกษพบว่าเชื้อราขาวเริ่มเกิดกระบวนการดูดซับสีข้อมที่เวลา 1 ชั่วโมงดูดซับเพียงเล็กน้อย แต่หลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงจะมีการดูดซับเพิ่มขึ้น

เซลล์ที่ยังมีชีวิตจะมีความหลากหลายในการเกิดกลไกการลดความเข้มสี แต่มีข้อเสียตรงที่จะต้องมีสภาวะที่เหมาะสมโดยจะต้องมีการควบคุมค่า พีเอช อุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบที่ต้องการสารอาหารที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เปรียบเทียบเซลล์ที่มี

ชีวิตกับเซลล์ที่ตายแล้ว พบว่า เซลล์ที่ตายแล้วมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าเซลล์ที่มีชีวิตอยู่

จากรายงานการศึกษาการดูดซับสีในเชื้อรา พบว่าสีถูกดูดซับไว้ที่ผิวเซลล์และบางส่วนถูกสะสมไว้ภายในเซลล์ เนื่องจากชนิดประจุบนเส้นใยรามีผลต่อการดูดซับสี โดยพบว่าเมื่อนำเส้นใยราที่ผ่านการฆ่าเชื้อ (Autoclaved Mycelia) น่าจะเป็นผลมาจากการดูดซับเนื่องมาจากการดูดซับเนื่องจากความแตกต่างของประจุบนผนังของเส้นใยราซึ่งมีประจุบวก การกำจัดสีใช้กลไกการบำบัดร่วมกัน 2 กลไกร่วมกันคือ การดูดซับสีเข้าไปไว้ในเยื่อหุ้มเซลล์และมีบางส่วนถูกดูดซับภายในเซลล์ไซโตพลาสซึมหลังจากนั้นจะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ภายในเซลล์ (Sirianuntapiboon *et al.*, 1988)

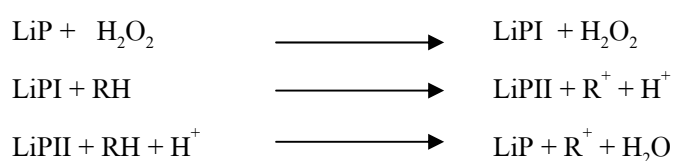
ประภา (2543) ได้ทำการวิจัยพบว่าเมื่อเติมสารอาหารลงไปเพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการฟอกสี ทำให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลน้ำกากส่าที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีปริมาณของโมเลกุลน้ำกากส่าที่มีขนาดใหญ่ลดลงมาก จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถอธิบายกลไกการลดความเข้มข้นสีได้ว่า การลดความเข้มข้นน้ำกากส่าสดที่เติมสารอาหารนั้น เนื่องจากเชื้อยีสต์ดูดซับโมเลกุลของสีเข้าไปไว้ในผนังเซลล์และเกิดการย่อยสลายจุลินทรีย์สีในที่สุด ดังรายงานของ (Tozawa *et al.*, 1979) ที่พบว่ามียูนิทรีที่สามารถลดความเข้มข้นน้ำกากส่าได้โดยจะต้อง มีสารบางอย่างไปกระตุ้น นั่นก็คือสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำกากส่ารายงานของ (สันทัด, 2528) ที่รายงานว่า มีน้ำตาลกลูโคสเป็นตัวกระตุ้นทำให้เชื้อราสามารถลดความเข้มข้นน้ำกากส่าได้ (Watanabe *et al.*, 1982) รายงานว่า การลดความเข้มข้นน้ำกากส่าเกิดจากการเกิดจากการที่เชื้อจุลินทรีย์สร้างเอนไซม์ การดูดซับความเข้มข้นน้ำกากส่าโดยเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นไปได้ว่าเชื้อยีสต์เกิดการดูดซับสีไว้ในผนังเซลล์แต่ไม่เกิดการย่อยสลาย จะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนแรกแต่จะไม่เกิดในขั้นตอนการย่อยสลายสีของน้ำกากส่าและจากการศึกษาพบว่าอัตราการฟอกสีน้ำกากส่าจะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดและมีการเติมน้ำตาลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเติมสารอาหารที่กระตุ้นการเกิดฟอกสีพบว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำกากส่าหมักลดลงด้วย จากรายงาน (ชวณิกจุฬและคณะ, 2540) พบว่าเชื้อจุลินทรีย์จะปลดปล่อยสีน้ำกากส่าที่ดูดซับเอาไว้ออกมาสู่อาหารเลี้ยงเชื้อได้อีกเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้การฟอกสีไม่มีค่าเพิ่มขึ้นในวันท้ายๆของการทดลอง

ชีวเคมีการย่อยสลายสารประกอบอะโรมาติกของเชื้อราโดยใช้เอนไซม์

การย่อยสลายสารประกอบอะโรมาติกโดยเอนไซม์จากเชื้อราอาจเกิดกลไกหลายๆแบบร่วมกัน เช่น การทำให้วงแหวนอะโรมาติกแตกออกโดยการเติมออกซิเจน (Oxidative Fission) หรือเกิดออกซิเดชันที่หมู่แอลฟาไฮดรอกซิล (Alpha - Hydroxyl) การเติมน้ำที่ส่วนแอลฟาคาร์บอนิล (Alpha-Carbonyl) และการตัดพันธะเอริลอีเทอร์ (Aryl Ether) เป็นต้น เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายลิกนินประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิดเรียกรวมว่า Ligninolytic Enzymes ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์ประเภทเปอร์ออกซิเดส (Peroxidases) และออกซิเดส (Oxidases) หลายชนิด ที่สำคัญได้แก่ เอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (Lignin Peroxidases) แลคเคส (Laccases) แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (Manganese Peroxidases) และเอนไซม์ออกซิเดสชนิดที่ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 – Producing Oxidase) เป็นต้น เอนไซม์เหล่านี้เป็นเอนไซม์ชนิดที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ที่เชื้อราผลิตขึ้นและปล่อยออกมาย่อยสลายสารจำพวกอะโรมาติกซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านเข้าเซลล์ได้ เอนไซม์ที่สำคัญและเกี่ยวข้อง ได้แก่

1. เอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส

ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (LiP) หรือมีชื่อตามระบบว่า E.C. 1.11.1.14; Diarylpropane: Hydrogen Peroxide Oxidoreductases พบครั้งแรกในราขาว *Phanerochaete chrysosporium* (Glenn, 1983; Tien and Kirk, 1983) กลไกการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 ได้อนุมูลบวก (Cation Radical) ของ Porphyrin ¶ เรียก LiPI ซึ่งจะถูกรีดิวซ์โดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน 1 ตัว ได้สารตัวกลาง (intermediate) คือ LiPII ซึ่งในปฏิกิริยานี้จะเกิดการออกซิไดส์สารประกอบอะโรมาติก เช่น veratryl alcohol ได้อนุมูลบวกเอริล (Aryl Radicals) ปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีดังนี้



การเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบถ่ายเทอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว (One-Electron Oxidation) ของหมู่อะโรมาติกโดยเอนไซม์ชนิดนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากทำให้ได้อนุมูลบวกซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้เมื่อมีออกซิเจนซึ่งระบบย่อยสลายลิกนินดังกล่าวมีลักษณะไม่จำเพาะเจาะจง ทำให้สามารถนำเอนไซม์กลุ่มนี้ไปใช้ออกซิไดส์สารประกอบอะโรมาติกอื่นๆ ได้อีกมากมาย ตัวอย่างเช่น สารประกอบ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Polychlorinated Phenol, Dioxins และ Azo dye เป็นต้น

โดยทั่วไปลิกนินเปอร์ออกซิเดสเร่งปฏิกิริยาได้หลายแบบเช่น การแตกของ C α -C β การออกซิไดส์ C β การแตกของพันธะระหว่างอัลคิลและแอริล (Alkyl-Aryl Bond) และการแตกของวงแหวนอะโรมาติก การดึงหมู่เมทอกซิล (Demethoxylation) การดึงหมู่เมทิล (Demethylation) การเติมหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxylation) ตลอดจนการต่อสายโพลิเมอร์ (Polymerization)

ลิกนินเปอร์ออกซิเดสที่พบแล้วในปัจจุบันมีมากกว่า 21 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความคงตัว (Stability) และลักษณะในการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction) แตกต่างกัน ราที่ผลิตลิกนินเปอร์ออกซิเดสได้ เช่น *Phlebia radiata*, *Coliulus versicolor*, *Coriolus hirsutus*, *Pluotus ostreatus*, *Bjerkandera adusta*, *Polyporous ostreiformis* รวมทั้ง Imperfect Fungi เช่น *Penicilium thomii* เป็นต้น

2. เอนไซม์แลคเคส

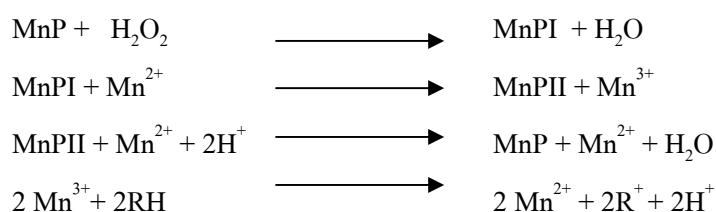
เอนไซม์ชนิดนี้มีชื่อตามระบบว่า E.C. 1.10.3.2; Benzenediol : Oxygen Oxidoreductases มีคุณสมบัติเป็นไกลโคโปรตีนที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบและจัดอยู่ในกลุ่มของเอนไซม์ที่เรียกว่า Blue Copper Oxidases (Thruston, 1994) แลคเคสเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) หลายชนิดเช่น Catechol, Hydroquinone, 2,6-Dimethoxyphenol และ Syringaldazine แบบที่ถ่ายเทเพียง 1 อิเล็กตรอน (One-Electron Oxidation) ได้สารกึ่งตัวกลางกับอนุมูลฟีนอกซีอิสระ (Free Phenoxy Radicals) นอกจากนั้น ABTS (2,2'-Azinobis-3-Ethylbenzothiazoline-6-Sulphonic Acid) ซึ่งเป็นสับสเตรทสังเคราะห์ของแลคเคสยังทำหน้าที่เป็นสับสเตรทร่วม (Co-Substrate) หรือ Mediator ในปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย (Bourbonnais and Paice, 1990) แลคเคสเร่งปฏิกิริยาได้หลายแบบเช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การแตกออกระหว่างหมู่อัลคิลกับหมู่แอริล การแตกระหว่าง C α -C β การแตกของหมู่ฟีนอล 2 หมู่

นอกจากนั้นยังเร่งปฏิกิริยาการคั่งหมู่มะทอกซิดและหมู่มะทิล ตลอดจนการต่อสายโพลิเมอร์และการตัดสายโพลิเมอร์ (Depolymerization) อีกด้วย

เชื้อราที่มีรายงานว่าผลิตแลคเคสได้มีหลายชนิด ที่สำคัญคือราในชั้น Basidiomycetes สกุลต่างๆ เช่น *Agaricus*, *Bjerkandera*, *Coprinus*, *Fomes*, *Ganoderma*, *Phanerochaete*, *Phlebia*, *Plurotus* และ *Trametes* เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบแลคเคสในราชั้น Ascomycetes หลายสกุลเช่น *Neurospora* และ *Xylaria* เป็นต้น สำหรับราพวก Imperfect ที่ผลิตแลคเคสได้ ได้แก่ *Agaricus*, *Botrytis*, *penicilium* และ *Trichoderma* เป็นต้น

3. เอนไซม์แมงกานีสเปอร์ออกไซด์

แมงกานีสเปอร์ออกไซด์ (MnP) มีชื่อตามระบบว่า E.C. 1.11.1.13; Mn(II) : H₂O₂ Oxidoreductase พบครั้งแรกในรา *Phanerochaete Chrysosporium* (Kuwahara *et al.*, 1984) ปัจจุบันพบไอโซเอนไซม์ของ MnP แล้วหลายชนิด MnP เป็นโคโคโปรตีนที่เร่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ชนิดหนึ่งอิเล็กตรอนของสารประกอบที่ไม่ใช่ฟีนอลเมื่อมี Mn(II) ดังสมการต่อไปนี้



จากสมการจะเห็นว่าปฏิกิริยาเริ่มต้นเกิดระหว่าง MnP กับ H₂O₂ ได้สารตัวกลางคือ MnPI ซึ่งออกซิไดซ์ Mn(II) ได้ Mn(III) และ Mn(III) จะถูกทำให้คงตัวโดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนให้กับกรดอินทรีย์ เช่น แลคเตดมาโดเนตหรือ ออกซาเลทและจะออกซิไดซ์สารประกอบอะโรมาติกได้อนุมูลฟีนอกซีหรืออนุมูลบวแกเรียล

ราที่ผลิต MnP ได้ได้แก่ Basidiomycetes หลายชนิดเช่น *P. chrysosporium*, *Phlebia radiata*, *Coliulus versicolor*, *lentinula edodes*, *Plerotus ostreatus*, *Bjerkandera adusta*, *Ganoderma australis* และ *Polyporus ostreiformis* เป็นต้น

การลดความเข้มข้นของสีย้อมที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยใช้เชื้อรานั้นเป็นทางเลือกที่ดีที่จะนำมาใช้แทนวิธีการหรือนำมาประยุกต์ใช้หรือส่งเสริมระบบบำบัดที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสีย้อมมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เชื้อราในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีย้อมในเชื้อราที่อยู่ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ต้องปราศจากสิ่งรบกวนในการทำการวิจัยแต่ละขั้นตอน จึงต้องมีการศึกษาอีกมากเพื่อทำการพัฒนาการนำเชื้อราไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมในอนาคตสำหรับในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเชื้อราขาวชนิด *T. versicolor* มาใช้ในการวิจัย มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการลดความเข้มข้นของสีย้อมถึงปฏิกิริยาชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบจมตัวเพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นไปในอนาคต

ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ถึงปฏิกิริยาชีวภาพที่มีเมมเบรนจมตัว (Muhammad, 2005)

ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ในการกำจัดสารอินทรีย์ สามารถหาได้จากสมการพื้นฐานที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารอาหารที่จำกัดของระบบบำบัดแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ส่วนใหญ่จะใช้สมการในการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ใช้แบบจำลองของโมโนด Metcalf and Eddy (1979) ได้กล่าวถึงสมการโมโนดดังนี้

$$\mu = \mu_m S / (K_s + S) \quad (1)$$

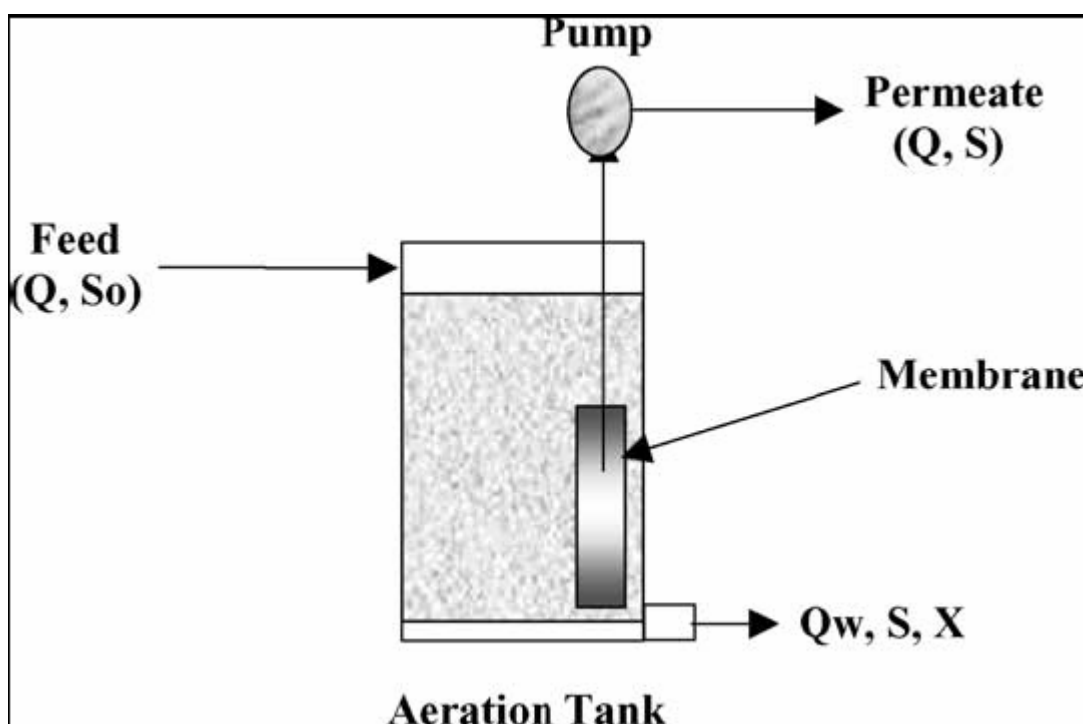
โดยที่

μ_m คือ อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์ต่อเวลา

μ คือ อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่อเวลา

S คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (น้ำหนัก / ปริมาตร)

K_s คือ ค่าความเข้มข้นของสารอาหารเมื่อมีการอัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (น้ำหนัก / ปริมาตร)



ภาพที่ 5 แผนภาพการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนจมตัว

จากภาพที่ 5 ซึ่งแสดงแผนภาพแบบจำลองถึงปฏิกรณ์ชีวภาพโดยมีเมมเบรนจมตัว (Completely-mixed IMBR reactor) ในการพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของถึงปฏิกรณ์โดยมีเมมเบรนต้องพิจารณาที่สภาวะดังต่อไปนี้

- (1) เป็นถึงปฏิกรณ์ที่มีการกวนสมบูรณ์โดยมีเมมเบรนจุ่มลงในถึง (เครื่องเติมอากาศแบบหัวฟู่เป็นตัวที่ทำให้เกิดการกวนสมบูรณ์ภายในถึงปฏิกรณ์)
- (2) ความเข้มข้นสารอาหารที่เข้าระบบ (ใช้น้ำเสียสังเคราะห์)
- (3) น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบไม่มีตะกอนของจุลินทรีย์
- (4) ปริมาตรในถึงคงที่ (อัตราการน้ำที่ไหลเข้าถึงและน้ำที่ออกจากถึงต้องเท่ากัน)
- (5) เมมเบรนต้องไม่ยอมให้ตะกอนจุลชีพที่ละลายน้ำผ่านได้
- (6) เมมเบรนไม่สามารถกรองสารอาหาร (กลูโคส) เนื่องจากกลูโคสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- (7) ระบบต้องอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์

สมดุลสมการ (Mass Balance Equations) ระหว่างความสัมพันธ์ของปริมาณจุลินทรีย์กับปริมาณสารอาหารดังนี้

อัตราการเจริญเติบโตสุทธิ = อัตราการสร้างเซลล์- อัตราการตาย- อัตราการย่อยสลาย

$$VdX/dt = \mu XV - k_d XV - Q_w X \quad (2)$$

เมื่อ

V = ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (ลิตร)

X = ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ (มก./ล.)

k_d = อัตราการตายของจุลินทรีย์ (วัน⁻¹)

Q_w = อัตราการไหลน้ำมีปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ระบายออก (วินาที⁻¹)

t = เวลา (วินาที)

$$\mu = k_d + Q_w/X \quad (3)$$

กำหนดให้

$$SRT = (VX) / (Q_w/X) = V/Q \quad (4)$$

แทนค่าสมการที่ 4 ลงใน สมการที่ 3 ได้ผลดังนี้

$$\mu = k_d + 1/SRT \quad (5)$$

แทนค่า μ จากสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 1 จะได้ค่า yield

$$S = [K_s ((1/SRT) + k_d)] / [\mu_m - ((1/SRT) + k_d)]$$

$$Vds/dt = QSo - \mu(XV/Y) - S(Q - Q_w) - Q_w S \quad (7)$$

ที่สภาวะคงที่ $ds/dt = 0$ แทนค่าลงในสมการที่ 7 ได้ค่าดังนี้

$$(Q/V)(So - S) = \mu(X/Y) \quad (8)$$

แทนสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 8 โดยที่สภาวะคงที่ของความเข้มข้นมวลจุลินทรีย์

$$X = (Y(Q/V)) [(S_o-S) / (k_d + (1/SRT))] \quad (9)$$

ในระบบที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องและถึงปฏิกิริยาที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ จะหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองขนาดห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) หรือขนาด (Pilot Scale) ซึ่งจะมีการพิจารณาจากค่าระยะเวลาเก็บกัก (HRT) หรือ การเปลี่ยนแปลงค่าระยะเวลาอายุตะกอน (SRT) ที่สภาวะคงที่

ทำการบันทึกและวัดค่าปริมาณตะกอนจุลินทรีย์กับค่าความเข้มข้นสารอาหารที่ออกจากเมมเบรน (Permeate Substrate Concentration) สามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ดังนี้คือ K_s , μ , Y และ k_d ซึ่งสามารถหาได้จากสมการเส้นตรงจากสมการที่ 6 และ 9

หาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ k_d และ Y จากสมการที่ 9

$$(Q/VX) (S_o-S) = ((1/Y)(1/SRT)) + k_d / Y \quad (10)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ μ_m และ K_s จากสมการที่ 6

$$SRT / (1+(SRT \cdot k_d)) = ((K_s / \mu_m) (1/S)) + (1 / \mu_m) \quad (11)$$

จากสมการที่ 10 นำมาพล็อตระหว่าง $Q(S_o-S)/VX$ กับค่า $1/SRT$ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์คือค่า k_d และ Y จากค่าความชัน (Slope) และจุดตัดแกน y จากสมการที่ได้จากกราฟข้างต้น

จากนั้นแทนค่า k_d ในสมการที่ 11 และพล็อต $SRT / [1+SRT k_d]$ กับ $1/S$ จะได้ค่า μ_m และ K_s ซึ่งหาได้จากค่าความชันและค่าจุดตัดแกน y

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B.Driessel and L.Christov (2001) ได้ทำการศึกษาการลดความเข้มข้นของสีที่เกิดจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษ โดยที่น้ำเสียที่ออกจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษจะมีความเข้มข้นของสีสูงและยังมีสารพิษปนเปื้อนอยู่ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทำการวิจัยโดยทำแบบจำลองที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

(Lab-Scale) ด้วยการจำลองระบบบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ที่มีแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC) รวมถึงได้ทำการศึกษาการลดความเข้มข้นของสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยใช้เชื้อรา 2 ชนิด คือ *Coriolus versicolor* และ *Rhizomucor pusillus* strain RM7 พบว่าเชื้อราทั้ง 2 ชนิดสามารถลดความเข้มข้นสีได้ในช่วง 53.0-73.0 % โดยใช้ระยะเวลาการเก็บกัก (HRT) 23 ชั่วโมงอีกทั้งน้ำที่ออกจากระบบบำบัดที่มีเชื้อรานี้ไม่มีสารพิษ (Nontoxic) ออกสู่ธรรมชาติอีกด้วย จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสีของเชื้อราทั้ง 2 ชนิด โดยได้มีการเติมกลูโคสลงไปเพื่อกระตุ้นให้เกิดการทำกิจกรรมบางอย่างขึ้นในเชื้อราที่ทำการศึกษาวิจัยซึ่งการเติมกลูโคสสามารถกระตุ้นให้มีการเกิดกิจกรรมขึ้นในเชื้อราขาว (White Rot Fungi) ชนิด *Coriolus versicolor* ขึ้นแต่ไม่เกิดกับเชื้อราชนิด *Rhizomucor pusillus* เป็นเชื้อราที่ใช้ในการศึกษาแต่ไม่ได้อยู่ในสกุลเดียวกับเชื้อราขาว จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวนี้สามารถอธิบายถึงกลไกในการลดความเข้มข้นสีได้ดังนี้คือจากการที่ *C. versicolor* เกิดกิจกรรมขึ้นจากการเติมกลูโคสที่เป็นแหล่งคาร์บอนที่สำคัญจะไปกระตุ้นให้เชื้อราชนิดนี้ซึ่งเป็นราขาว มีการผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลายลิกนินหรือย่อยสารที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ซึ่งเกิดเอนไซม์ขึ้น 2 ชนิด คือ แมงกานีสเปอร์ออกซิเดสและแลคเคส สรุปได้ว่ากลไกในการลดสีของเชื้อราขาวเกิดจากกลไก 2 อย่างนั่นคือ กลไกการดูดซับ (Adsorption) และกลไกการย่อยสลายสีโดยการผลิตเอนไซม์ (Biodegradation) แต่เชื้อราที่ไม่ใช่เชื้อราขาว เกิดกลไกในการลดความเข้มข้นสีได้ 1 กลไก คือ กลไกการดูดซับ (Adsorption) เข้าไปในตัวมันเองแค่เพียงกลไกเดียว อีกทั้งยังมีการศึกษาวิจัยต่อไปอีกพบว่าระยะเวลาเก็บกักภายในถัง และการลดความเข้มข้นสีมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ จากการศึกษาการเพาะเชื้อรา 2 ชนิดในถังปฏิกรณ์ที่มีแผ่นหมุนชีวภาพ RBC พบว่า *C. versicolor* ที่ระยะเวลาเก็บกัก 23 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสีได้สูงสุด 58% จากการศึกษาสามารถอธิบายให้เห็นว่ากลไกของการลดความเข้มข้นสีเกิด 2 กลไกที่ระยะเวลาแตกต่างกันคือจะเกิดการดูดซับด้วยตัวมันเองขึ้นภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ขึ้นภายในหลังจาก 48 ชั่วโมงทำให้ประสิทธิภาพของการลดสีเพิ่มขึ้นด้วย และเชื้อราชนิด *R. pusillus* ในถังปฏิกรณ์ที่มีแผ่นหมุนชีวภาพ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 24 ชั่วโมงประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสีได้สูงสุด 63.0 % โดยกลไกในการลดความเข้มข้นสีโดยการดูดซับด้วยตัวมันเอง ในช่วงระยะเวลานั้นได้มีการนำเชื้อราชนิดอื่นนอกจากเชื้อราขาวซึ่งสามารถลดความเข้มข้นสีและการดูดซับเข้าไปในตัวมันจากสีหลากหลายชนิด สำหรับการใส่เชื้อราในการลดความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีขมอมนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดขึ้นอยู่กับสถานะของเชื้อรา ได้แก่ เซลล์ที่มีชีวิต (Living Cell) จะมีการย่อยสลายหรือการแตกตัวทางชีวภาพ (Biodegrade) และการดูดซับโดยตัวมัน (Biosorp) ส่วนเชื้อราที่ตาย (Dead Cell) จะไม่สร้างกิจกรรมก็จะเกิดการดูดซับสีขมอมอย่างเดียว (Adsorb) สำหรับเชื้อราที่ยังมีชีวิตจะมีการสร้างกิจกรรมภายในเซลล์ จะมี

กลไกสำคัญที่สุดคือการย่อยสลายทางชีวภาพเพราะ ตัวเชื้อราเองมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ที่
 ย่อยสลายลิกนิน (Lignin modifying enzymes) , Laccase, Manganese Peroxidase (MnP) และ Lignin
 Peroxidase (LiP) ที่มีส่วนประกอบของสารสังเคราะห์จากลิกนินหรือสีย้อมนั่นเอง (Raghukumar et al.,
 1996; Fu and Viraraghavan, 2001) อย่างไรก็ตามสิ่งที่ยังไงก็ตามสิ่งที่มีความสัมพันธ์กันในการลด
 ความเข้มของสีย้อมที่จะมีความแตกต่างกันในเชื้อราหลากหลายชนิด นั่นคือ LiP, MnP และ laccase
 สำหรับเชื้อรา *P. chrysosporium* พบว่าเชื้อราชนิดนี้มีการผลิตเอนไซม์ LiP ในการลดความเข้มสี
 ย้อม (Pasti-Grisby et al., 1992) ได้มีการศึกษาโดย Ollikka et al (1993) รายงานว่าเอนไซม์ชนิด LiP
 มีหน้าที่สำคัญในการลดความเข้มสีชนิดอาโซ (Azo Dye), Triphenyl Methane, Heterocyclic และ
 Polymeric Dyes จาก *P. chrysosporium* แต่ไม่มีการผลิตเอนไซม์ชนิด MnP ออกมาย่อยสลายทาง
 ชีวภาพในขณะเดียวกันที่ Yang and Yu (1997) ได้ทำการศึกษถึงการลดความเข้มสีย้อมโดยการให้
 สีย้อมที่แตกต่างกัน 8 ชนิดสีย้อมที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันประกอบไปด้วย สีชนิดอาโซ
 (Azo), แอนทราควินโนน (Anthraquinone) ,อินดิโก (Indigo) และสีที่มีโครงสร้างซับซ้อนที่มี
 โลหะหนัก (Metal Complex) ใช้เชื้อราชนิด *T. versicolor* และมีรายงานออกมาว่าเอนไซม์ MnP
 ไม่ลดความเข้มสีย้อมในขณะที่เอนไซม์ Ligninase –Catalyzed Oxidation สามารถลดความเข้มสี
 ย้อมได้มากกว่า 80% Glenn and Gold (1983) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้สีย้อม 3
 ชนิด ได้แก่ Poly B-411, Poly R-481 และ Poly Y-606 เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการตรวจวัด
 กิจกรรมการย่อยสลายลิกนินของรา *Phanerocheate chrysosporium* พบว่าการย่อยสลายสีโดยรามี
 ลักษณะหลายประการที่สอดคล้องกับการย่อยสลายลิกนิน กล่าวคือการย่อยสลายสีเกิดหลังเชื้อ
 เจริญเต็มที่แล้วถูกยับยั้งเมื่อมีไนโตรเจนปริมาณสูงในอาหารเลี้ยงเชื้อและถูกกระตุ้นด้วยออกซิเจน
 นอกจากนั้นสารที่ยับยั้งการย่อยสลายลิกนินเช่น Thiourea, Azide และ 4'-O- Methylisoeugenol ยัง
 สามารถยับยั้งการย่อยสลายสีได้ด้วยเช่นเดียวกันและพบว่าสายพันธุ์กลายของ *P. chrysosporium* ที่
 ไม่มีเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสและกิจกรรมย่อยสลายลิกนินไม่สามารถสีโพลิเมอร์พวกนี้ได้ ซึ่งผล
 ทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่าการย่อยสลายสีโพลิเมอร์ทั้งสามชนิดของเชื้อราดังกล่าวเกี่ยวข้องกับ
 กิจกรรมการย่อยสลายลิกนิน Bollag and Leonowicz., 1984 ทำการสำรวจการผลิตแลคเคสในราเบ
 ลิดิโอไมไซค์ (Basidiomycetes), แอสโคไมไซค์ (Ascomycetes) และดิวเทอโรไมไซค์
 (Deuteromycetes) หลายชนิด เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาวะ
 ที่ไม่มีการเขย่าและเติม 2,5-Xyldine ลงไปในเชื้อที่เจริญเต็มที่แล้ว พบว่า การผลิตแลคเคสจะ
 เพิ่มขึ้นในราบางชนิดเช่น *Fomes annosus*, *Pholiota mulabilis*, *Plurotus ostreatus* และ *Trametes*
versicolor Walder et.al., 1988 ได้ทำการเปรียบเทียบการย่อยสลายลิกนินของรา White-Rot 6 ชนิด
 ได้แก่ *Chrysosporium pruinsum*, *Coriolus versicolor*, *Plurotus ostreatus*, *Bjerkandera adustus*,

Trametes cigulata และ *Fomes lignosus* กับของ *P. chrysosporium* พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ การผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินของราบางสายพันธุ์จะถูกกระตุ้นด้วย Veratryl Alcohol และพบว่าการย่อยสลายลิกนินเกิดในสถานะที่ไม่มีการเขย่าได้เร็วกว่าในสถานะที่มีการเขย่าในราบางชนิด ในขณะที่ผลการทดลองเป็นในทางตรงกันข้ามในราชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่า การจางลงของสีรามาสอล บลู (Remazol Blue) ที่เติมลงไป ในขณะที่เลี้ยงเชื้อจะแสดงถึงการเริ่มเกิดกิจกรรมย่อยสลายลิกนินของราเหล่านี้ได้ Ollikka และคณะ (1993) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมประเภทต่างๆ ได้แก่ สีเอโซ สีไตรฟีนิลมีเทน (Triphenyl Methane Dyes) สีเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic Dyes) และสีโพลีเมอริกวม 10 ชนิด โดยรา *P. chrysosporium* พบว่าสีส่วนใหญ่ถูกจางสีลงไปมากกว่า 75 % ของสีเดิมยกเว้นสี Congo red, Poly R-478 และ Poly T-128 นอกจากนี้ยังตรวจสอบการย่อยสลายสีโดยเอนไซม์บริสุทธิ์ของลิกนินเปอร์ออกซิเดส 3 ชนิด พบว่าให้ผลใกล้เคียงกับการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ไม่บริสุทธิ์ แสดงว่าลิกนินเปอร์ออกซิเดส นอกจากนั้นการย่อยสลายจะเกิดได้ดีเมื่อมี Veratryl Alcohol ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Buswell and Odier, 1987; Orth and Tien, 1995; Heinzkill and Messner, 1997) จะเห็นได้ว่าเชื้อรากลุ่มย่อยสลายลิกนินสามารถผลิตเอนไซม์ได้หลายชนิดที่สำคัญคือ เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการแตกของวงแหวนอะโรมาติก นอกจากนั้นการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ประเภทนี้ยังมีลักษณะแบบไม่จำเพาะเจาะจง ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลได้หลากหลาย ซึ่งรวมทั้งสารประกอบสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ยากและเป็นมลพิษสำคัญของสิ่งแวดล้อม ได้มีการศึกษาเพื่อนำเชื้อราย่อยสลายลิกนินและเอนไซม์จากเชื้อรากลุ่มนี้มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น การฟอกขาวเยื่อไม้เพื่อผลิตกระดาษ การบำบัดน้ำทิ้งที่มีสีสังเคราะห์ปนเปื้อน ตลอดจนการย่อยสลายสารประกอบเคมีที่มีพิษหลายชนิดเช่น สารประกอบพวก Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs) และยาฆ่าแมลง เป็นต้น ดังที่กล่าวมาแล้วว่าเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินทำงานแบบไม่จำเพาะเจาะจงต่อโครงสร้างของลิกนิน ดังนั้นจึงได้มีการทดลองนำเชื้อราย่อยสลายลิกนินและเอนไซม์จากเชื้อราเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการย่อยสลายสารเคมีที่ย่อยสลายได้ยากหลายชนิดซึ่งรวมทั้ง สีเอโซ และสีย้อมประเภทอื่นๆ