

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแยกทีละขั้นตอน สลับกันแบบหนึ่ง ที่มีลักษณะการทำงานที่รวมเอาทั้งเติมอากาศและถังตกตะกอนไว้ในถังเดียวกัน ระบบเอสบีอาร์เริ่มแรกเป็นแบบ fill and draw ซึ่งทำงานโดยการเติมน้ำเสียเข้าในถังปฏิบัติการจนเต็มถัง แล้วเติมอากาศจนกระทั่งสามารถกำจัดความสกปรกได้จนถึงจุดที่ต้องการแล้ว ก็จะทำให้สลัดจ์ตกตะกอน จากนั้นก็ปล่อยน้ำเสียส่วนบนทิ้งไป ก่อนที่จะเริ่มต้นวัฏจักรใหม่อีกครั้งหนึ่ง

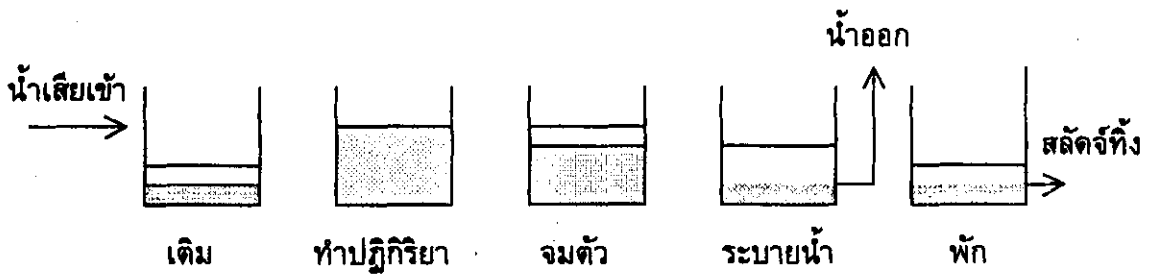
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแยกทีละขั้นตอนสลับกันที่มีลักษณะแบบ fill and draw นี้ ถูกใช้กันจริงๆ ในช่วงปี ค.ศ.1914 ถึง 1920 ก่อนที่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องที่มีการพัฒนาทั้งเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ใช้จะเข้ามาแทนที่ในช่วงต้นปี ค.ศ.1960 (Orhan และ Artan, 1994)

จนกระทั่งในช่วงทศวรรษที่ 1970 ระบบเอสบีอาร์ก็กลับมาเป็นที่สนใจอีกครั้ง โดยได้รับการปรับปรุงรูปแบบระบบ มีการนำไมโครโปรเซสเซอร์มาใช้ในการควบคุมระบบ รวมถึงการใช้นิวมาติกวาล์ว โซลินอยด์วาล์ว มอเตอร์วาล์ว เซนเซอร์ควบคุมระดับ เครื่องวัดอัตราการไหล และเครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติด้วย (Randall และคณะ, 1992) ระบบเอสบีอาร์แบบเดิมถูกศึกษาและปรับปรุงใหม่โดย Irvine (1979) อ้างโดย Gardinia (1993) จนสามารถทำงานได้เป็นที่น่าพอใจ ระบบใหม่นี้สามารถใช้งานกับน้ำเสียที่สมบัติแปรเปลี่ยนในระยะเวลาสั้นๆ ได้ดีกว่าระบบอื่นด้วย

2.1.1 ลักษณะการทำงานของระบบเอสบีอาร์

ลักษณะการทำงานของระบบเอสบีอาร์ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลักในแต่ละรอบการทำงาน คือ

1. เติม (fill)
2. ทำปฏิกิริยา (react)
3. จมตัว (settle)
4. ระบายน้ำ (draw)
5. พัก (idle)



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของระบบเอสบีอาร์ (Orhan, 1994)

น้ำเสียจะถูกเติมเข้าสู่ถังปฏิกิริยาผสมกับจุลชีพที่มีอยู่เดิมจนเต็มถึงขั้นต่อมาคือการเติมอากาศให้แก่จุลชีพทั้งหมด ซึ่งอาจจะเริ่มเติมในขณะเติมน้ำเสียเลย จากนั้นจึงหยุดเติมอากาศ เพื่อปล่อยให้จุลชีพจมตัวและแยกตัวออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยที่น้ำใสส่วนบนของถังจะถูกระบายทิ้งออกจากถังปฏิกิริยา สำหรับในขั้นตอนสุดท้ายคือการพัก น้ำนี้จะใช้ในกรณีที่ระบบเอสบีอาร์ใช้ถังปฏิกิริยามากกว่า 1 ถังในเวลาเดียวกัน และต้องมีการเหลือเวลาในการเติมน้ำเสีย จึงต้องมีช่วงพักให้เติมน้ำเสียในถังแรกให้เสร็จก่อนที่จะเปลี่ยนไปถังอีกใบหนึ่ง เมื่อครบรอบการทำงานแล้วก็จะเริ่มเติมน้ำเสียรอบใหม่อีกครั้งหนึ่ง (Metcalf & Eddy, 1991) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ในการระบายสลัดจิ้งซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในระบบเอสบีอาร์ แต่ไม่ได้อบรมอยู่ในขั้นตอนทั้ง 5 ขั้นตอนนั้น ปริมาณและความถี่ในการระบายสลัดจิ้งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งถ้าระบบมีสารอินทรีย์มากก็จะผลิตจุลชีพได้มาก จึงต้องระบายสลัดจิ้งมากขึ้นหรือบ่อยขึ้น แต่ถ้ามีสารอินทรีย์ในน้ำเสียน้อย ผลิตจุลชีพได้น้อย ก็ไม่ต้องระบายสลัดจิ้งบ่อยหรือระบายออกในปริมาณที่น้อยลงได้

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสบีอาร์

ระบบเอสบีอาร์เป็นระบบที่เหมาะสมกับการใช้กับแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่มีเงินลงทุนในการบำบัดน้ำเสียต่ำ และต้องการการควบคุมดูแลระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น โรงงานอุตสาหกรรม หรือหมู่บ้านจัดสรร ซึ่งระบบเอสบีอาร์จัดได้ว่ามีข้อดีกว่าระบบต่อเนื่องหลายประการ ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาของ Hopker และ Schroeder (1979) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียที่มีอัตราภาระ (loading rate) ต่ำนั้น สามารถบำบัดโดยใช้ระบบเอสบีอาร์ ได้คุณภาพน้ำออกที่ดีกว่า นอกจากนี้ Ketchum และ Liao (1979) ยังกล่าวว่าระบบเอสบีอาร์นั้นมีศักยภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี เช่นเดียวกับ Irvine และคณะ (1979) ที่กล่าวว่าระบบเอสบีอาร์มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน จุดเด่นอีกข้อหนึ่ง

ของระบบเอสบีอาร์ คือการป้องกันการไม่จมตัวของสลัดจ์ เนื่องจากลักษณะการทำงานของระบบนี้คัดพันธุ์(selector)จะไม่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดเส้นใยที่เป็นสาเหตุของการไม่จมตัวของสลัดจ์

สรุปข้อดีของระบบเอสบีอาร์

1. ระบบเอสบีอาร์ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบเวียนสลัดจ์กลับ
2. ระบบเอสบีอาร์สามารถรองรับสภาพช็อกในช่วงเวลาสั้นๆได้ดีกว่าระบบต่อเนื่อง
3. ระบบเอสบีอาร์สามารถหลีกเลี่ยงสภาพที่เกิดการไหลออกของเซลล์ภายหลังการรับสภาพช็อกในช่วงเวลาสั้นๆได้
4. ระบบเอสบีอาร์สามารถตัดแปลงให้กำจัดสารคาร์บอนอินทรีย์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจน โดยกระบวนการแอนแอโรบิก แอน็อกซิก และออกซิก ได้ในถังปฏิกริยาเดียวกัน
5. ระบบเอสบีอาร์มีความยืดหยุ่นในการปรับอัตราส่วนของช่วงเวลาในการเติมกับช่วงที่เกิดปฏิกริยา ทำให้สามารถรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงได้

สรุปข้อเสียของระบบเอสบีอาร์

1. ในการใช้ระบบเอสบีอาร์หลายถังเพื่อรับน้ำทิ้งที่ไหลติดต่อกันตลอดวันในอัตราที่ไม่คงที่ จำเป็นต้องใช้ระบบอัตโนมัติหลายอย่าง ซึ่งในระบบแบบต่อเนื่องไม่จำเป็นต้องใช้
2. ระบบเอสบีอาร์ไม่เหมาะกับแหล่งน้ำเสียขนาดใหญ่ โดยเฉพาะถ้าใช้แบบถังเดียวนั้นต้องใช้ถังใหญ่มาก
3. เพื่อให้การควบคุมระบบเอสบีอาร์ง่ายขึ้น อาจต้องมีถังพักน้ำทิ้งก่อนปล่อยเข้าระบบ
4. มีขีดจำกัดในการเลือกใช้เครื่องเติมอากาศ

2.2 การกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ (biological nutrient removal : BNR)

ธาตุอาหารหลักในน้ำเสียที่มีผลต่อสภาพแหล่งน้ำคือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งถ้าในน้ำทิ้งมีธาตุอาหารทั้งสองอยู่เป็นจำนวนมากเมื่อถูกปล่อยออกสู่แหล่งน้ำแล้ว จะก่อให้เกิดปัญหา

ต่อระบบนิเวศน์น้ำเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่มีผลเป็นพิษต่อปลา หรือไนโตรเจนในรูปของไนเตรดและฟอสฟอรัสที่เป็นธาตุอาหารที่มีผลให้สาหร่ายและพืชน้ำเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้สภาพน้ำในแหล่งน้ำเปลี่ยนสีเป็นสีเขียวหรือแดงของสาหร่าย หรือที่เรียกว่าเกิดยูโทรฟิเคชัน ทำให้เกิดสภาพการขาดแคลนออกซิเจนในแนวกลางคืน และเมื่อสาหร่ายเหล่านี้ตายไปก็จะตกตะกอนทับถมเกิดสภาพน้ำเน่าเสียต่อไป การควบคุมการเกิดยูโทรฟิเคชันที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งคือ การลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้ง โดยใช้กระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ

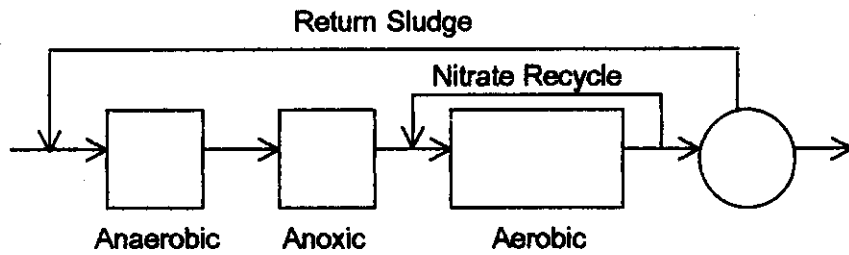
กระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการแยกที่เวเต็คสลัดจ์ โดยเพิ่มส่วนที่ไม่เติมอากาศเข้ามาในระบบ อาจเป็นถังเดียวหรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งถ้าหากในระบบหนึ่งๆนั้นมีถังตกตะกอนเพียงถังเดียวที่ทำหน้าที่ตกตะกอนและเวียนกลับมวลจุลชีพเข้ามาในระบบ เรียกระบบนั้นว่าระบบสลัดจ์เดี่ยว (single sludge system) กระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพมีด้วยกันหลายระบบ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นระบบหลักๆ 3 ระบบด้วยกัน คือ

ก). ระบบที่กำจัดไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวเป็นระบบที่ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแอโรบิก ส่วนที่เป็นแอน็อกซิก และถังตกตะกอน ตัวอย่างเช่น ระบบคลองวนเวียน ระบบสลัดจ์เดี่ยว และระบบสลัดจ์คู่

ข). ระบบที่กำจัดฟอสฟอรัสอย่างเดียวประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแอนแอโรบิก ส่วนออกซิก และส่วนตกตะกอน เช่น ระบบแอนแอโรบิก-ออกซิก และระบบ Phostrip

ค). ระบบที่กำจัดทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะประกอบไปด้วยส่วนแอนแอโรบิก แอน็อกซิก และออกซิก เช่น กระบวนการ Modified หรือ Five-Stage Bardenpho, กระบวนการยูซีพี (University of Capetown process), กระบวนการวิโอพี (The Virginia Initiative Plant process), และกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก ซึ่งจะใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

กระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิกประกอบด้วยถังแอนแอโรบิก ถังแอน็อกซิก และถังออกซิก เรียงกันตามลำดับ (ดังรูปที่ 2.2) โดยการกำจัดไนโตรเจนจะเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นแอน็อกซิกกับออกซิก สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นแอนแอโรบิกและออกซิก ซึ่งกลไกในการทำงานของระบบจะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.2 ระบบบีเออนอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก (Randall, C.W., 1992)

2.2.1. การกำจัดไนโตรเจน

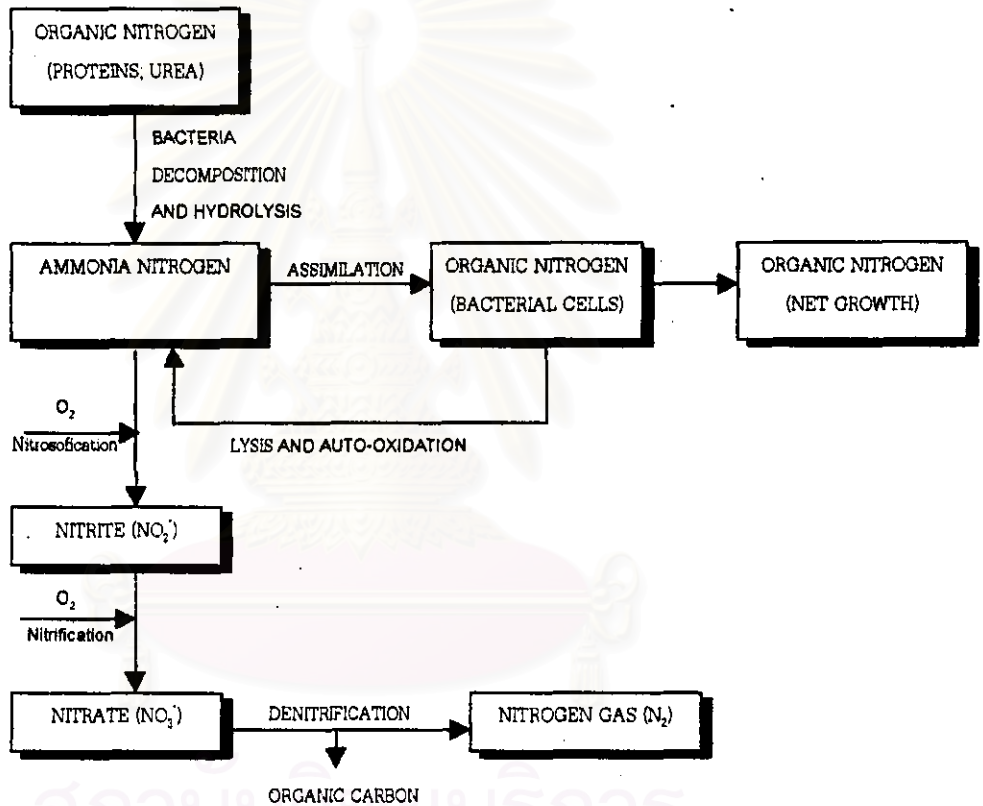
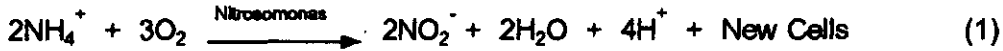
ไนโตรเจนในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแอมโมเนียหรือไนโตรเจนอินทรีย์ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารละลายและเป็นอนุภาค โดยที่ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำจะอยู่ในรูปของยูเรียและกรดอะมิโน ส่วนไนเตรตและไนไตรต์ในน้ำเสียนี้จะมีในปริมาณที่น้อยมากหรืออาจไม่มีเลย สำหรับส่วนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกกำจัดออกไปในถังตกตะกอนชั้นที่หนึ่ง ซึ่งเมื่อเข้าสู่การบำบัดทางชีวภาพแล้วสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียและเป็นสารอนินทรีย์

เมื่อเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการกำจัดแล้วไนโตรเจนเหล่านั้นก็จะถูกกำจัดด้วยกลไกหลัก 2 กลไกด้วยกันคือ กระบวนการแอสสิมิเลชันและกระบวนการไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งกระบวนการแอสสิมิเลชันจะเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนส่วนหนึ่งไปเป็นไนโตรเจนอินทรีย์อยู่ในรูปของเซลล์แบคทีเรียแล้วส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะถูกกำจัดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการเปลี่ยนรูปอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นไนไตรต์ ในกระบวนการไนโตรโซฟิเคชัน (nitrosification) โดยไนโตรโซฟายอิงแบคทีเรียที่ชื่อไนโตรโซโมนัส ขั้นตอนที่สองเป็นการออกซิไดส์ไนไตรต์เป็นไนเตรตหรือที่เรียกว่า กระบวนการไนตริฟิเคชันแท้จริง (true nitrification) โดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่ชื่อไนโตรแบคเทอร์ แล้วไนเตรตที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนออกสู่อากาศโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ก). กระบวนการไนตริฟิเคชัน

ไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการออกโทโทรฟิกอย่างหนึ่ง ซึ่งได้พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันขององค์ประกอบไนโตรเจนและแอมโมเนียเริ่มต้นไปใช้ในการเจริญเติบโต

โตของเซลล์ ซึ่งแบคทีเรียชนิดออกซิโดโทรฟที่ทำหน้าที่ในการออกซิเดชันแอมโมเนียไปเป็นไนเตรต โดยที่จะผ่านการเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรต์ก่อนในชั่วขณะหนึ่ง มีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ ไนโตรโซโมนัส และไนโตรแบกเทอร์ ดังสมการ (Sedlak, 1991)

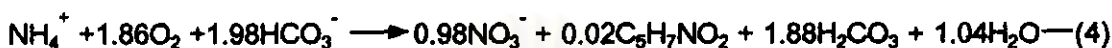


รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในกระบวนการทางชีวภาพ (Sedlak, 1991)

ปฏิกิริยาในสมการที่ 1 และ 2 เป็นปฏิกิริยาที่คายพลังงาน ซึ่งแบคทีเรียไนโตรโซโมนัส และไนโตรแบกเทอร์จะใช้พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยานี้ไปใช้ในการทำงานและสร้างเซลล์ ปฏิกิริยาที่รวมพลังงานทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 3



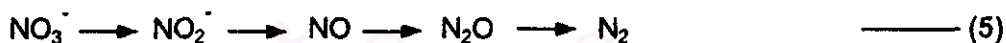
ในปฏิกิริยาจริงเมื่อเซลล์ถูกสังเคราะห์พร้อมๆกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความต้องการออกซิเจนก็จะลดลง เพราะเซลล์จะใช้ออกซิเจนจากแหล่งคาร์บอนอื่นได้ด้วย คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปฏิกิริยารวมทั้งหมดเมื่อเกิดออกซิเดชันและการสังเคราะห์เซลล์เป็น ดังสมการที่ 4 (Metcalf & Eddy, 1991)



จากสมการจะเห็นได้ว่าการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจน 1 กรัม จะต้องใช้ออกซิเจน 4.33 กรัม ใช้สภาพต่าง 7.14 กรัมในรูปหินปูน สร้างเซลล์ 0.15 กรัมและเกิดคาร์บอนอินทรีย์ 0.08 กรัม จะเห็นได้ว่า ความต้องการออกซิเจนจะใกล้เคียงกับปริมาตรรวมที่ไม่คิดการสังเคราะห์เซลล์ (4.57 กรัมออกซิเจน/กรัมแอมโมเนียมไนโตรเจน) ดังนั้นการสังเคราะห์เซลล์จึงไม่มีผลมากนักต่อการกำจัดไนโตรเจน และจากสมการจะเห็นได้ว่าต้องใช้สภาพต่าง ดังนั้นในระบบที่น้ำเสียมีค่าสภาพต่างต่ำและ/หรือมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนสูง ต้องเติมต่าง เช่นปูนขาวหรือไบคาร์บอเนต เพื่อควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะกับการเกิดไนตริฟิเคชัน

ข). กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ลดรูปของไนเตรดไนโตรเจนเป็นไนโตรเจนก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งมีมากที่สุด, ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และไนตริกออกไซด์ (NO) ภายใต้สภาวะแอน็อกซิก ดังสมการที่ 5 (Orhan, 1994)

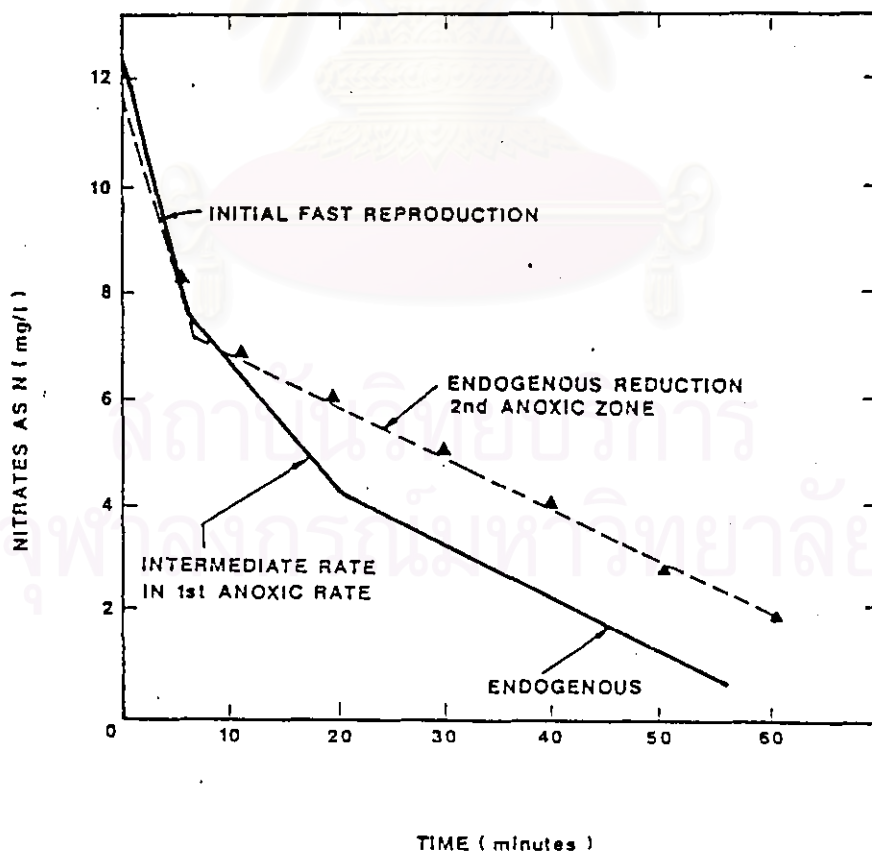


ในสภาวะแอน็อกซิกซึ่งปราศจากออกซิเจนอิสระ มีแหล่งออกซิเจนในรูปของไนเตรดเพียงแหล่งเดียวที่แบคทีเรียสามารถใช้ได้ น้ำเสียที่จะถูกดีไนตริฟายได้นั้นต้องมีแหล่งคาร์บอนอินทรีย์เพียงพอที่จะให้แบคทีเรียใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเปลี่ยนไนเตรดไปเป็นไนโตรเจนก๊าซ ซึ่งแหล่งคาร์บอนนี้ก็สามารถหาได้จากแหล่งคาร์บอนภายในเช่น จากน้ำเสียและจากเซลล์ หรือการเพิ่มจากแหล่งคาร์บอนภายนอก เช่น เมทานอล เอทานอล หรือกรดอะซิติก เป็นต้น

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียส่วนใหญ่ที่สามารถดำรงชีพได้ ถึงแม้สภาพแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบคทีเรียชนิดเฮเทอโรโทรปที่ใช้คาร์บอนอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แบคทีเรียพวกนี้จะเป็นแฟ

คัลเททไฟแบกที่เรียที่สามารดดำรงชีวิตได้ไม่ว่าในน้ำเสียจะมีออกซิเจนอิสระ ออกซิเจนในรูปของไนเตรด หรือไม่มีออกซิเจนเลยก็ตาม

แหล่งคาร์บอนภายนอกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ไม่ว่าจะเป็นค่าอุณหภูมิหรือความเข้มข้นของออกซิเจนล้วนมีผลด้วยทั้งสิ้น ซึ่งในการบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้น Barnard (1975) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันนั้นจะมี 3 ระยะด้วยกัน ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอัตราช่วงแรกของแอน็อกซิกคือ 50 มก./ล.ชม. ในช่วงเวลา 5 ถึง 15 นาทีนั้น เป็นผลผลอยได้ต่อเนื่องมาจากการหมักของถังแอนแอโรบิก ซึ่งในเวลาต่อมาในอัตราที่สองคือ 16 มก./ล.ชม. นั้นเป็นผลจากการสร้างเซลล์ปกติของอนุภาคและสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งอัตรานี้จะเกิดจนกระทั่งแหล่งอาหารภายนอกถูกใช้หมดไป ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันช่วงที่สาม ช่วงสุดท้ายคือ 5.4 มก./ล.ชม. นั้นเป็นการหายใจของเซลล์ในช่วงเอนโดจีนัส (endogenous respiration)



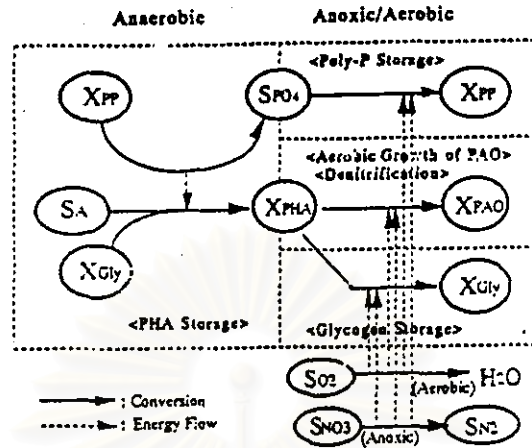
รูปที่ 2.4 อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชัน (Barnard, 1975)

2.2.2 การกำจัดฟอสฟอรัส

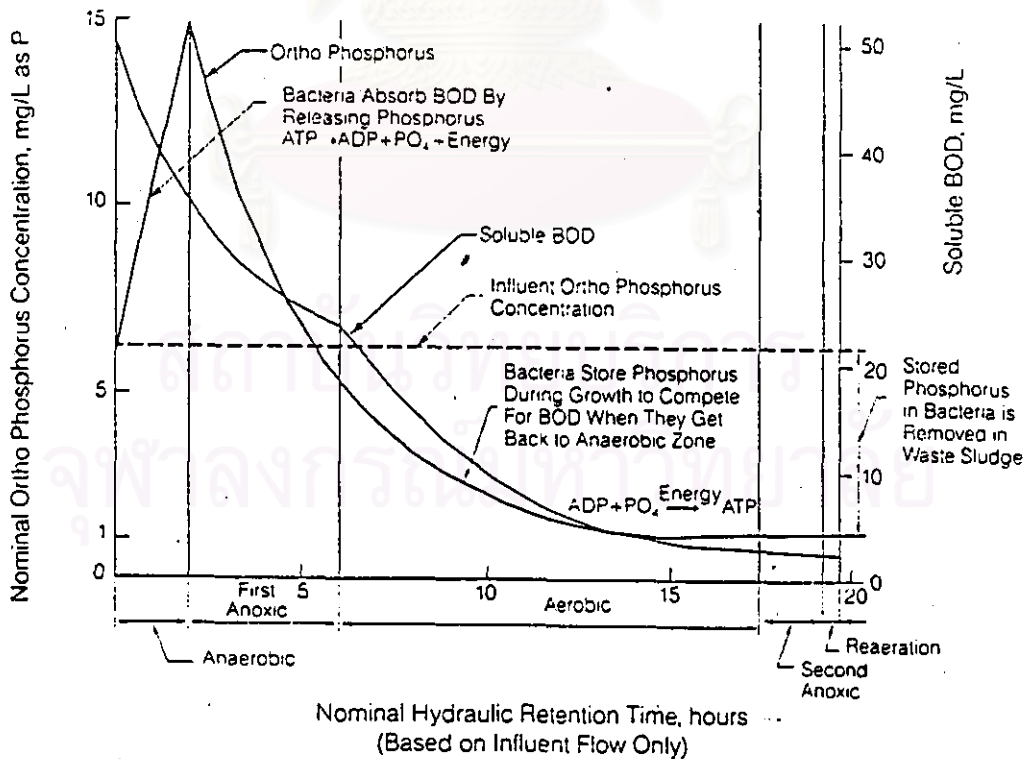
ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของออร์โทฟอสเฟต (PO_4^{3-}) โพลีฟอสเฟต ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) และฟอสฟอรัสอินทรีย์ ซึ่งฟอสฟอรัส 2 รูปสุดท้ายนั้นมีถึงร้อยละ 70 ของฟอสฟอรัสในน้ำเข้าทั้งหมด (Metcalf & Eddy, 1991) จุลชีพจะใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสในช่วงที่มีการสังเคราะห์เซลล์และถ่ายเทพลังงาน ซึ่งพบว่าร้อยละ 10 ถึง 30 ของฟอสฟอรัสในน้ำที่เข้ามานั้นจะถูกกำจัดได้ในการบำบัดทางชีวภาพขั้นที่สอง ที่ภายใต้สภาวะเติมอากาศฟอสฟอรัสจำนวนมากจะถูกจับใช้โดยจุลชีพ และจะถูกปล่อยออกจากเซลล์ในช่วงที่เป็นแอนแอโรบิก

แบคทีเรียที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้นั้นมี 4 ประเภทใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ Aeromonas/Vibrio, Acinetobacter Spp., Pseudomonas Sp. และ Coliform (Kavanaugh และ Randall, 1994) โดยที่แบคทีเรียเหล่านี้จะมีความสามารถในการสะสมฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษ ซึ่งเรียกรวมๆว่าโพลี-พีแบคทีเรีย ในการทำงานโพลี-พีแบคทีเรียจะดึงเอากรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid, VFAs) จากน้ำเสียภายใต้สภาวะที่เป็นแอนแอโรบิกเข้ามาใช้ กระบวนการเมตาโบลิซึมภายในเซลล์ และเก็บสำรองไวเอฟเอเหล่านี้ไว้ในรูปของพียเอชเอ (poly- β -hydroxyalkanoate, PHA) ซึ่งเท่ากับ พียเอชบี (poly- β -hydroxybutyrate, PHB) รวมกับพียเอชวี (poly- β -hydroxyvalerate, PHV) ในขณะเดียวกันก็ปล่อยออร์โทฟอสเฟตออกมาภายนอกเซลล์ ซึ่งเมื่อเข้าสู่สภาวะที่เป็นแอโรบิก พียเอชเอที่ถูกเก็บสำรองไว้นี้จะถูกย่อยสลายโดยดึงเอาออกซิเจนจากภายนอกมาใช้ได้เซลล์ใหม่และเกิดพลังงานขึ้น โดยที่พลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ในการดึงเอาออร์โทฟอสเฟตจากภายนอกเซลล์มาสะสมไว้ภายในเซลล์ได้อย่างมากเป็นพิเศษ ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ภายในเซลล์มากเป็นพิเศษนี้จะถูกกำจัดออกจากระบบด้วยการระบายสลัดจ์ทิ้งเพื่อรักษาอายุสลัดจ์ตามปกตินั่นเอง รูปแบบกลไกการกำจัดฟอสฟอรัสแสดงดังรูปที่ 2.5 และลักษณะการปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในสภาวะต่างๆแสดงดังในรูปที่ 2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัส (Mino, 1995) (XPP: Polyphosphate, XPHA: Polyhydroxyalkanoate, XGly: Glycogen, XPAO: Polyphosphate Accumulating Biomass, SA: Fermentation Products like Acetate, SPO₄: Inorganic Soluble Phosphate, SO₂: Dissolved Oxygen, SNO₃: Nitrate and Nitrite, SN₂: Nitrogen)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในกระบวนการบีโอนอาร์ (WEF Manual and Practice, 1992)

2.3 สีย้อม (Dyes)

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527) กล่าวว่าสีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใดๆมาใช้อย่างให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่า อิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้คือ

- ก). พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)
- ข). แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals' forces)
- ค). แรงไอออน (ionic forces)
- ง). พันธะโควาเลนต์ (covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่แต่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสี หรืออาจกล่าวง่ายๆว่ารูปร่างและขนาดของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีขี้เล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น อันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น ดังนี้ เป็นต้น

2.3.1 การเกิดสีของสีย้อม

Witt, O.N. (อ้างโดย ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) ได้สรุปว่าสีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดมาจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่ง ภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า "โครโมฟอร์" (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ

1. กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) : $-\text{NO}$ (หรือ $=\text{N}-\text{OH}$)
2. กลุ่มไนโตร (nitro group) : $-\text{NO}_2$ (หรือ $=\text{NO}.\text{OH}$)
3. กลุ่มเอโซ (azo group) : $-\text{N}=\text{N}-$
4. กลุ่มเอทิลีน (ethylene group) : $\begin{array}{c} \diagup \text{C}=\text{C} \diagdown \\ \diagdown \text{C}=\text{O} \diagup \end{array}$
5. กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) : $\begin{array}{c} \diagup \text{C}=\text{O} \diagdown \end{array}$
6. กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group) : $\begin{array}{c} \diagup \text{C}=\text{NH} \text{ และ} \\ -\text{CH}=\text{N}- \end{array}$
7. กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group) : $\begin{array}{c} \diagup \text{C}=\text{S} \text{ และ} \\ \diagdown \text{C}-\text{S}-\text{S}-\text{C} \diagup \end{array}$

กลุ่มอะตอมต่างๆเหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสี ย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม "ออกโซโครม" (auxochromes) อันได้แก่ $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NHR}$, $-\text{NR}_2$, $-\text{SO}_3$ และ $-\text{COOH}$ เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า "โครมาเจน" (chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน (aminoazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_5$ กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ $-\text{N}=\text{N}-$ กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ $-\text{NH}_2$ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจน คือ $\text{C}_6\text{H}_5-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2$ ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.3.2 การจำแนกสีย้อม

อัจฉราพร ไชละสุต, 2527 กล่าวว่าสีที่ใช้ย้อมสิ่งทอตามลักษณะกายภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้เรียกกันว่าสีย้อม (dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่าพิกเมนต์ (pigments) น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีราคาถูกที่สุด ดังนั้นแม้ว่าสีบางตัวไม่ละลายในน้ำแต่สามารถละลายได้ในสารตัวอื่น โรงงานผู้ผลิตจะต้องพยายามค้นคว้าหาวิธีมาทำให้สีตัวนั้นละลายในน้ำให้ได้ ใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นให้น้อยที่สุดที่จะน้อยได้ สีเมื่อละลายน้ำแล้วจะดูดซึมเข้าไปภายในเส้นใย บางตัวจะติดเส้นใยได้ดีพอสมควร ทนการซักและกระบวน

การใช้น้ำอื่นๆ บางตัวจะมีพันธะหรือโซ่ (linkage) เชื่อมโยงอยู่ระหว่างเส้นใยกับตัวสีทำให้ติดทนทานยิ่งขึ้น สีบางตัวจะติดเส้นใยได้เอง แต่ขณะเดียวกันก็หลุดออกมาได้ง่าย

ปีกเมนต์ไม่ละลายน้ำ ย้อมเส้นใยให้เกิดสีได้แบบเดียวกับสีย้อมโดยให้ปีกเมนต์กระจายตัว (disperse) หรือบางครั้งก็ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเป็นการยากที่จะทราบว่าสีตัวไหนเป็นสีย้อมและตัวไหนเป็นปีกเมนต์ ยิ่งไปกว่านั้นยังมีสีย้อมบางตัวที่เวลาย้อมจะต้องทำให้ละลายเสียก่อน เมื่อทำการย้อมแล้วจึงเปลี่ยนเป็นตัวสีที่ไม่ละลายน้ำภายในเส้นใยซึ่งก็จะกลายเป็นปีกเมนต์ ทำให้การแบ่งแยกเช่นนี้เกิดความสับสน

การจำแนกสีตามส่วนประกอบทางเคมี ยังมีความยุ่งยากมากขึ้นไปอีก ถ้าเป็นผู้ที่ได้ศึกษาวิชาเคมีมาแต่เพียงเล็กน้อย เท่าที่ผลิติดอกจำหน่ายในขณะนี้ สีในกลุ่มเคมีเดียวกัน มีวิธีย้อมแตกต่างกัน ไซ้กับเส้นใยแตกต่างกัน เช่น สีในกลุ่มอะโซบางตัวย้อมง่าย ๆ โดยตรงเป็นสีไคเรกท์ (direct) บางตัวจะติดได้เมื่อนำย้อมมีภาวะเป็นกรดก็เป็นสีแอซิด (acid dyes) บางตัวจำเป็นต้องมีสารบางอย่างมาช่วยจึงจะติดเส้นใยได้ก็เรียกว่าสีมอร์แดนท์ (mordant dyes) จะเห็นได้ว่าจดจำได้ยาก การจำแนกตามวิธีเดิมคือเรียกตามกระบวนการย้อมบ้าง ตามลักษณะของสีบ้าง ให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้เป็นอันมาก การจำแนกวิธีนี้จึงเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี แม้แต่สมาคมผู้ย้อมสีและผู้ผลิต (The Society of Dyes and Colourists) ก็ยอมรับว่าเป็นวิธีจำแนกสีที่เหมาะสมที่สุด หนังสือดรชนีสี (colour index) ก็ใช้การจำแนกวิธีนี้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกสีตามส่วนประกอบทางเคมีก็ยังมีประโยชน์ในการที่จะศึกษาถึงกลไกการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วย จึงจะนำเสนอการจำแนกสีย้อมทั้งแบบทางโครงสร้างเคมี และแบบการใช้งาน ดังนี้

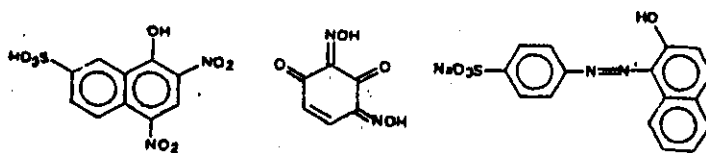
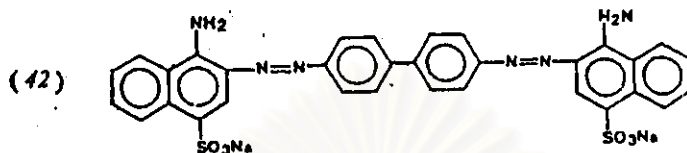
ก). การจำแนกสีย้อมจากโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี แสดงตัวอย่างสี และลักษณะโครงสร้างดังตารางที่ 2.1

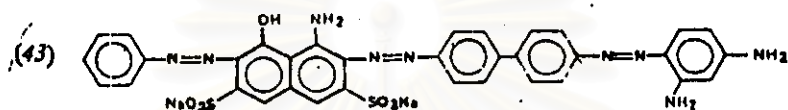
ตารางที่ 2.1 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (Rangnekar, 1980)

Class	Subclass	Example	Structure
Nitro	-	Naphthol yellow S	(39)
Nitroso	-	Fast Green O	(40)
Azo	Monoazo	Acid Orange II	(41)
	Disazo	Congo Red	(42)
	Trisazo	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)
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	(63)
Sulphurized vat dyes	-	Hydron Blue R	(64)
Phthalocyanine	-	Monastral Fast Blue	(65)

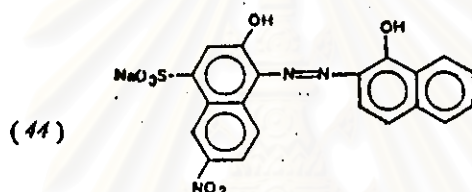
BS

Naphthol yellow S
(39)Fast Green O
(40)Acid Orange II
(41)

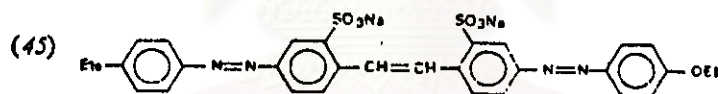
Congo Red



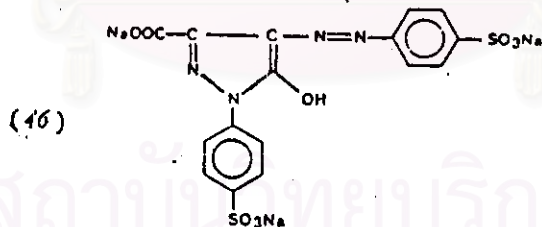
Direct Black BW



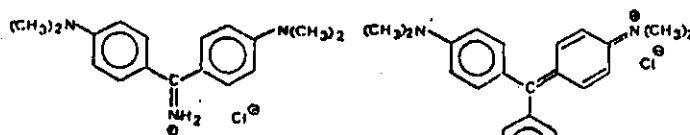
Eriochrome Black T

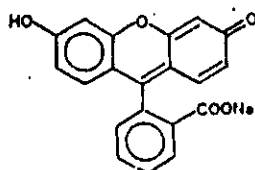


Chrysophenine G

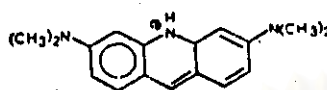


Tartrazine

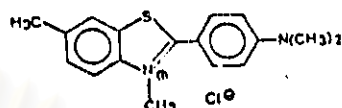
Auramine O
(47)Malachite Green
(48)



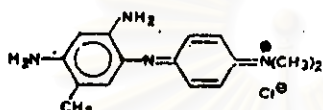
Fluorescein
(49)



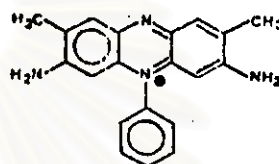
Acridine Orange NO
(50)



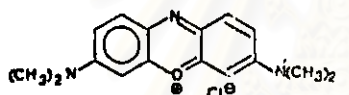
Basic Yellow T
(51)



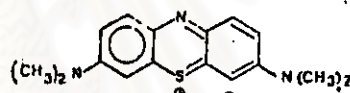
Toluylene Blue
(52)



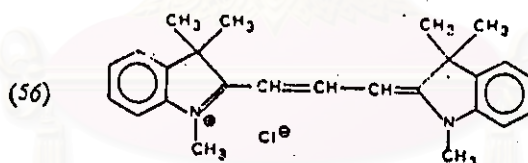
Safranine T
(53)



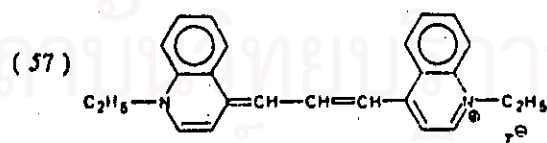
Capri Blue GN
(54)



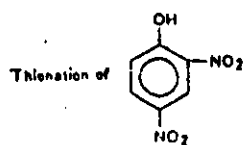
Methylene Blue
(55)



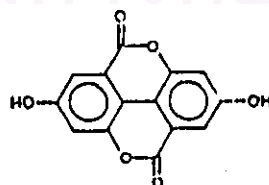
Astraflaxine FF
(56)



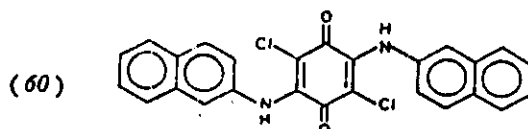
Kreptocyanine
(57)



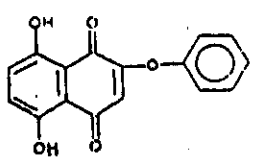
Sulphur Black T
(58)



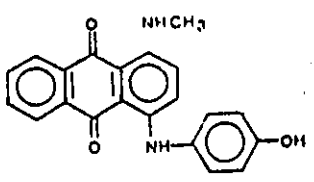
Resoflavine W
(59)



Helindon Brown CR
(60)

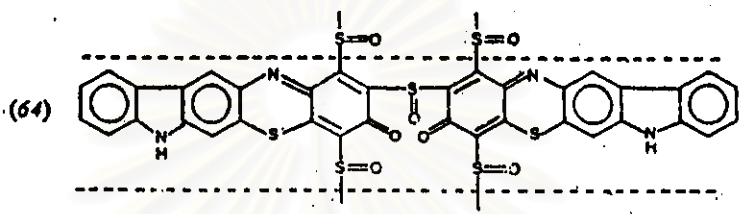


Alizarin Dark Green W
(61)

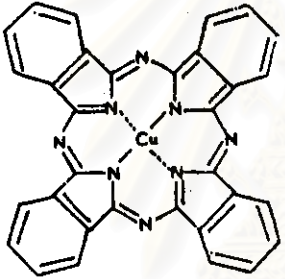


Perlon Fast Green BB
(62)

SD..3



Hydron Blue R



Monostral Fast Blue BS
(65)

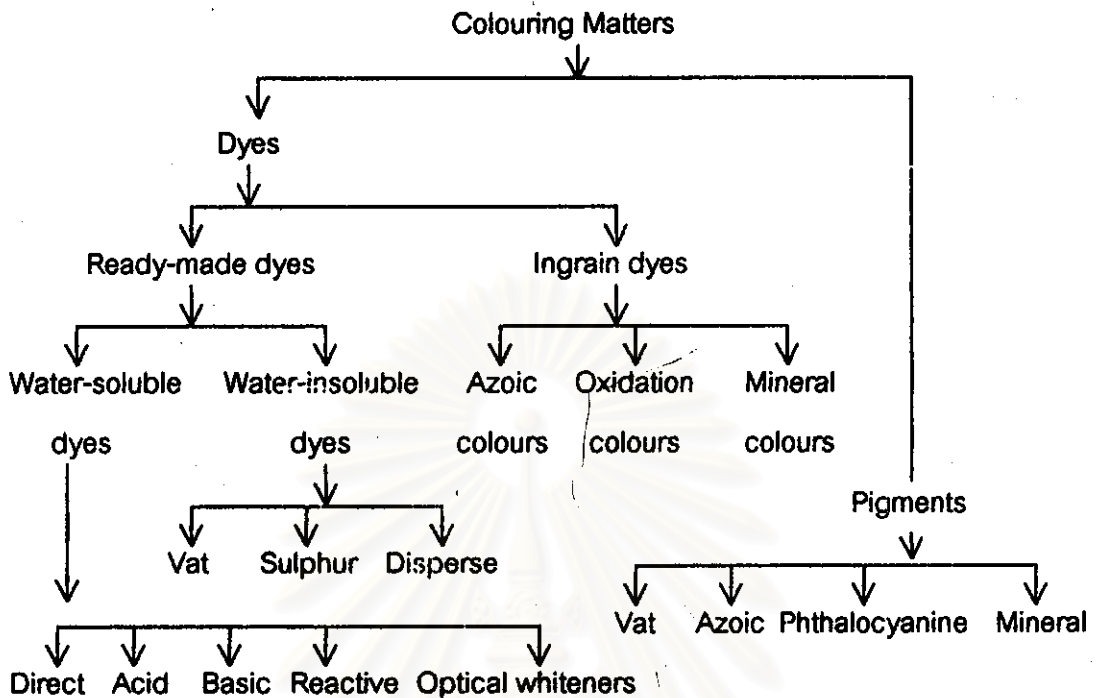
ข). การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน แสดงสมบัติกายภาพและเคมี
เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม และพื้นที่หรือกลไกการติดสี ดังตารางที่ 2.2 และแสดงสมบัติของสี
ย้อม ดังรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (Buckley, 1992 ; อ้างถึงในอภิชาติ, 2539)

ประเภทสีย้อม	สมบัติกายภาพและสมบัติเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด (acid dyes)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีดัดไม่แน่นอน	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 °ซ
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด (metal complex acid dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำน้อย - สีดัดแน่นอนดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110°ซ
สีย้อมไดเรกต์ (direct dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีดัดไม่แน่นอน	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายต่างอ่อน - เดิมอเลคโตรไลต์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อม ที่อุณหภูมิ 98°ซ
สีย้อมเบสิก (basic or cationic dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105°ซ
สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dye)	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์	- อะคริลิก - โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	- คอลลอยด์ของสีย้อมติดผิวกับเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4.5 - เดิมสีย้อม แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 130°ซ

ประเภทสีย้อม	สมบัติกายภาพและสมบัติเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
	- สัตติคแน่นดี			
สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สัตติคแน่นดี	- ฝ้าย - วิสกอส - ขนสัตว์	- พันธะโควาเลนต์	- แชนเส้นใยในสารละลายกรด - เติมนเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย - เติมน้ำด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยกับสีย้อม
สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สัตติคแน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- ปฏิกิริยาดกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมแวท (vat dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สัตติคแน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- ปฏิกิริยาดกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมอะโซอิก (azoic dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สัตติคแน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- ปฏิกิริยาดกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ - ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อมมอร์แดนต์หรือโครม (mordant or chrome)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ - สัตติคแน่นดี	- ขนสัตว์	- พันธะเชิงซ้อนของเส้นใยโครมและสีย้อม	- แชนเส้นใยในสารละลายกรด - เติมน้ำด่างโครเมต และสีย้อม - เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 °ซ



รูปที่ 2.7 สมบัติของสีย้อม (Shenai, 1977)

2.3.3 สีย้อมรีนออกทีฟ

ในอดีตได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามค้นคว้าหาวิธีย้อมใยเซลลูโลสให้ สีดึดทนทานดี ให้ตัวสีทำปฏิกิริยาโดยตรงกับเซลลูโลส การค้นคว้าที่สำเร็จและผลิตสีออก จำหน่ายเป็นครั้งแรก คือบริษัท อิมพีเรียล เคมีคัล อินคอปอเรชัน (Imperial Chemical Inc.) มี ชื่อเรียกย่อๆว่า ไอซีไอ (I.C.I.) เมื่อปี พ.ศ.2499 กระบวนการย้อมวิธีต่างๆและการพิมพ์ก็ได้รับความสนใจพัฒนาตามขึ้นมาด้วย นับว่าเป็นตัวสีซึ่งมีความสำคัญ เป็นตัวแทนของสีตัวอื่นๆที่ทำให้ เกิดเทคนิคการย้อมใหม่ๆ ตัวสีเองก็สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นโรงงาน ขนาดใหญ่หรือเล็กสามารถย้อมได้ผลดีเหมือนกันทั้งสิ้น มีสีหลายสี มีความคงทนดี ย้อมง่าย

ตัวสีของบริษัทไอซีไอ ใช้ชื่อทางการค้าว่าโปรเซียน (Procion) ประกอบด้วยตัวสี 3 หมู่ ผลิตออกจำหน่ายแล้วมากกว่า 70 สี ต่อมาก็มีอีกหลายบริษัทที่ผลิต ออกจำหน่าย ใช้ชื่อทางการค้าต่าง ๆ กัน เช่น บริษัทชิบา (Ciba) เรียกชิบาครอน (Cibacron) , บริษัทเอ็กท์ เรียกเรมาซอล (Remazol) เป็นต้น ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอมซึ่งสามารถทำ ปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสได้เมื่อมีด่างเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ทำให้สึดติดได้ดี และมากกว่าสีซึ่งติดโดยแรงฟิสิกส์-เคมี (physical-chemical forces) ซึ่งสามารถละลายตัวได้

สีรีแอกทีฟมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับพวกสีแอซิด แต่สีรีแอกทีฟมีหมู่ labile ที่ไม่เสถียรได้แก่ หมู่ -Cl หรือ -O-SO₃Na ซึ่งเป็นตัวทำให้สีรีแอกทีฟสร้างพันธะโควาเลนต์กับเส้นใยผ้าเซลลูโลสได้

สีรีแอกทีฟที่เป็นสีเหลือง ส้ม แดง ม่วง น้ำตาล และดำ โดยส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างอะโซ แต่สีฟ้าหรือน้ำเงินจะมีทั้งที่เป็นโครงสร้างอะโซ (Azo) แอนทราควินอน (Anthraquinones) และฟาโลไซยาไนน์ (Phthalocyanines) สีย้อมอะโซบางตัวมีโครงสร้างเป็นคอปเปอร์ นอกจากนี้สีดำ สีน้ำตาลบางตัว และสีรีแอกทีฟสำหรับย้อมผ้าขนสัตว์ มักจะมีโครงสร้างเป็นโครเมียมหรือโคบอลท์คอมเพล็กซ์ (Venkataraman, 1977) ซึ่งสามารถแยกเป็นเปอร์เซนต์โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟตามโทนสี ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปอร์เซนต์โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟที่แบ่งตามโทนสี (Shore, 1990)

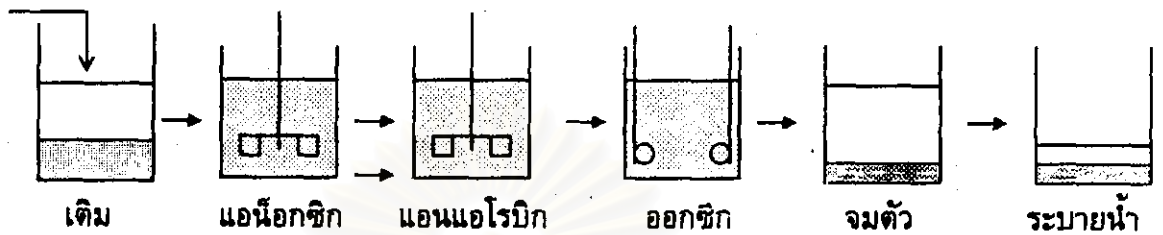
Chemical class	Distribution in hue sector (%)								% of all reactive dyes
	Yellow	Orange	Red	Violet	Blue	Green	Brown	Black	
Unmetallised azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-complex azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1

สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมชนิดที่นิยมใช้กันมากในการย้อมสีปัจจุบัน โดยสารประกอบของสีสังเคราะห์เหล่านี้โดยทั่วไปประกอบด้วย โครมาเจนและออกโซโครม (Chiu, 1978 ; อ้างถึงใน Hu, 1992) โครมาเจนมักจะประกอบด้วยสารอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารที่มีความคงตัวสูง กำจัดยาก (Hu, 1992)

2.4 กระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

หลักการการทำงานของกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

ขั้นตอนในการทำงานของกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

1. ขั้นเติมน้ำเสีย (fill)
2. ขั้นแอนน็อกซิก เนื่องจากการเดินระบบแบบเอสบีอาร์เป็นการทำงานแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งในขั้นตอนการระบายน้ำออกจะต้องเหลือน้ำทิ้งค้างอยู่ในถังปฏิบัติการในปริมาณหนึ่ง เพื่อป้องกันการหลุดปนออกไปของสลัดจ์กับน้ำทิ้ง (wash out) และกระบวนการที่เกิดขึ้นก่อนการระบายน้ำก็คือ กระบวนการออกซิก โดยที่แอมโมเนียและไนโตรเจนอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรต์และไนเตรต ทำให้น้ำที่เหลือน้ำค้างอยู่ในถังจะมีปริมาณไนเตรตจำนวนหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเริ่มเติมน้ำเสียเข้ามาใหม่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรกที่ไม่ได้มีการเติมอากาศเข้าไปจึงเป็นปฏิกิริยาแอนน็อกซิก
3. ขั้นแอนแอโรบิก เมื่อไนเตรตในถังปฏิบัติการถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนออกสู่อากาศจนหมดหรือใกล้หมดแล้ว จึงเริ่มเข้าสู่ช่วงปฏิบัติการแอนแอโรบิก ซึ่งแบกทีเรียจะมีการปล่อยฟอสฟอรัสออกมาสู่น้ำ
4. ขั้นออกซิก เป็นขั้นตอนในการออกซิเดชันสารอินทรีย์คาร์บอนและยังเป็นการดึงเอาฟอสฟอรัสในน้ำเสียกลับเข้าสู่เซลล์ของแบกทีเรียด้วย ส่วนแอมโมเนียและไนโตรเจนอินทรีย์ที่มากับน้ำเสียก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตดังที่ได้กล่าวมาแล้ว
5. ขั้นจมตัว เป็นการปล่อยให้สลัดจ์จมตัวแยกออกจากน้ำทิ้ง
6. ขั้นระบายน้ำ เป็นการระบายน้ำที่ได้รับการบำบัดแล้วออกจากระบบ โดยยังคงมีน้ำเหลือน้ำค้างอยู่ในถังปฏิบัติการปริมาณหนึ่ง แล้วก็จะกลับไปสู่ช่วงการเติมน้ำเสียเข้าดังในขั้นที่ 1 อีกครั้งหนึ่ง

2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ระบบทางชีวภาพ

Brown (1983) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการย่อยสลายทางชีวภาพขั้นต้น (การลดสี) ของน้ำเสียจากการฟอกย้อมภาพได้สภาวะแอนแอโรบิก ทำการทดลองกับสีย้อม 23 ชนิด โดยใช้แบคทีเรียจากโรงบำบัดน้ำเสียที่บำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นหลัก แล้วทำการทดลองในขวดแก้วที่ปิดสนิท มีวาล์วสำหรับระบายก๊าซที่เกิดขึ้น ประกอบเข้ากับเครื่องกวนด้วยแม่เหล็ก สีย้อมแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่สีย้อมชนิด แอซิด เบสิก มอร์แดนท์ ไคเรนท์ และรีแอกทีฟ ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันดังนี้ Monoazo, Disazo, Polyazo, Anthraquinone, Triphenylmethane, Stilbene, Oxazine, Phtalocyanine, Nitro และ Methine

ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของสีย้อม Monoazo 4 ชนิด และ Disazo 6 ชนิด ปรากฏว่าสามารถย่อยสลายได้ดี แต่ก็มีผู้วิจัยอีกหลายคน (Meyer, 1981 ; Wuhmann, 1980 ; Walker, 1970) ที่ศึกษาถึงการที่สีย้อมอะโซทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเกิดการแตกพันธะในกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสารที่เป็นพิษขึ้น

สำหรับสีย้อม Polyazo 2 ชนิด ได้ผลสรุปที่ยังไม่ชัดเจน แต่ก็พอจะบ่งบอกได้ว่าสีย้อม Polyazo ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากกว่าชนิด Monoazo หรือ Disazo

สีย้อม Anthraquinone 4 ชนิด และสีย้อมโครงสร้างอื่นๆอีก 6 ชนิด ผลการทดลองไม่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเท่าใดนัก จากผลการทดลองทั้งหมดจึงพอจะสรุปได้ว่าการสลายสีย้อมในสภาวะไร้อากาศมีความเป็นไปได้สูง

Brown (1987) ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยของ Brown และ Laboureur ในปี 1983 โดยทำการศึกษาใน 3 ประเด็นด้วยกันคือ

1. การแตกพันธะของสีย้อมในสภาวะแอนแอโรบิก โดยทำการทดลองในสภาพเดียวกับที่ใช้ในปี 1983 ใช้สีย้อมความเข้มข้น 100 มก./ล. ทั้งหมด 16 ชนิด เป็นสีย้อมชนิดแอซิด 8 ชนิด, ไคเรนท์ 5 ชนิด, เบสิก 1 ชนิด และมอร์แดนท์ 2 ชนิด โดยแบ่งเป็นโครงสร้างอะโซ 14 ชนิด, anthraquinone 1 ชนิด, phenoxazine 1 ชนิด โดยใช้เวลาในการย่อยสลายมากที่สุดคือ 56 วัน จากนั้นนำของเหลวส่วนที่ได้จากการย่อยสลายมาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารอโรมาติกอะมีนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่าสีย้อมหลายตัวได้สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกตามที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าการย่อยสลายสีในสภาวะแอนแอโรบิกเกิดสารอโรมาติกอะมีนขึ้นจริงๆ คาดว่าเป็นสารอะมีนที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของสีนั้นๆ

2. การสลายสารอาามีนที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการแอโรบิก ทดสอบโดยนำของเหลวที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกในข้อ 1 มาเข้าระบบแยกที่เว็คคัลลิตซ์ แล้ววัดค่าดีไอซี, ในสีย้อมบางตัวก็จะทำการวิเคราะห์ปริมาณของอโรมาติกอาามีนที่ลดลงด้วย ซึ่งปรากฏว่าสีย้อมที่ทำการทดลองทั้ง 9 ชนิดมีค่าดีไอซีลดลง และผลการวิเคราะห์ปริมาณของอโรมาติกอาามีนก็ลดลงด้วย
3. การทดลองทำการสลายสารอโรมาติกอาามีนเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการแอนแอโรบิกกับกระบวนการแอโรบิก โดยใช้สารอโรมาติกอาามีนที่คาดว่าน่าจะเกิดในกระบวนการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกของสีย้อมอะโซมา 8 ชนิด โดยทำการวัดค่าดีไอซีและสีบางชนิดก็จะทำการวัดปริมาณของสารอโรมาติกอาามีนที่ลดลงด้วย ผลปรากฏว่าการสลายแบบแอโรบิกให้ผลการสลายสารอโรมาติกอาามีนได้ดีกว่ากระบวนการแอนแอโรบิก

Randall et al. (1993) ทดสอบโดยการทำโรงงานนำร่องที่ POTW (Public Owned Treatment Works) ในเมือง Martinsville มลรัฐเวอร์จิเนีย เพื่อศึกษาถึงศักยภาพของการบำบัดด้วยระบบแอนแอโรบิก/ออกซิก (AO) สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงย้อมผ้า น้ำเสียที่นำมาเข้าระบบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ น้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้าประมาณ 75% ส่วนที่สองประมาณ 25% เป็นน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยกำหนดมาตรฐานไว้ว่าจะต้องบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ให้น้ำทิ้งมีค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอไม่เกิน 200 หน่วย (ADMI; American Dye Manufacturers Institute units) และทดสอบความเป็นพิษโดยวิธี LC50 โดยทำการทดสอบกับปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งคือ Ceriodaphnia dubia

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด คือแบบเติมรีดิวซิงเจเนต (thiourea dioxide) กับแบบไม่เติม

(เติม) Anaerobic → reducing agent → Aerobic

(ไม่เติม) Anaerobic → Aerobic

ในส่วนของแอนแอโรบิกแบ่งการทดลองออกเป็นอีก 2 ชุด คือแบบ 12 ชั่วโมง กับแบบ 6 ชั่วโมง ส่วนแอโรบิกใช้เวลากักเท่ากับ 30 วัน นอกจากนี้ยังมีการบำบัดน้ำที่ออกจากถังเติมอากาศด้วยโพลีเมอร์ (Magnifloc® 577-C) และมีการเติมคลอรีน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้ง

ผลการทดลองปรากฏว่า การบำบัดน้ำเสียสีโดยระบบที่ใช้แอนแอโรบิก 12 ชั่วโมง สามารถลดสีลงได้ประมาณ 60% และเมื่อทำการบำบัดต่อด้วยระบบเติมอากาศเกิดการลดสีลงเพียงเล็กน้อย สิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือไม่ว่าน้ำเสียที่เข้าจะมีปริมาณสีสูงหรือต่ำก็ตาม ค่าสีที่ออกจากถังแอนแอโรบิกมักจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนระบบที่ใช้แอนแอโรบิก 6 ชั่วโมง

โฆง การลดลงของสีไม่ค่อยด้นักประมาณ 15-20% การบำบัดแบบแอนแอโรบิกมีการลดลงของค่าที่ไอซีน้อย (คือสีที่กำจัดในระบบแอนแอโรบิกคงจะไม่ได้กลายเป็น $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ แต่อาจจะเกิดการแตกพันธะเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของสารประกอบทางเคมีตัวอื่น) การลดลงของค่าที่ไอซีจะเกิดขึ้นมากในช่วงที่เติมอากาศ ผลที่ออกมาจากการเติมรีดิวซิงเจเนนดัมมีแนวโน้มที่จะช่วยลดความเป็นพิษของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบได้และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีได้บ้าง นอกจากนี้เขายังสรุปได้ว่า การบำบัดแบบแอนแอโรบิกจะต้องใช้ควบคู่ไปกับระบบเติมอากาศเพื่อการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งลง และอาจใช้วิธีการตกตะกอนและการเติมคลอรีน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดสีให้ดีขึ้นได้

Carliell (1995) ได้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้เกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการกำจัดสีโดยกระบวนการแอนแอโรบิก ดังนี้

- ทดลองเพื่อหาลำดับโคเนติกของการกำจัดสี C.I.Reactive Red 141 ในแต่ละความเข้มข้นของสีที่ 100, 150 และ 200 มก./ล. เมื่อนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างค่า $\ln(C_t/C_0)$ (เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นของสีเมื่อเวลาเริ่มต้น, C_t คือความเข้มข้นของสีที่มีเวลาใดๆ) กับเวลา(ชม.) ได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งสรุปได้ว่าการลดลงของสีกับเวลาเป็นความสัมพันธ์ลำดับที่หนึ่ง
- การลดลงของสี C.I.Reactive Red 141 ที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. เมื่อมีสีเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงแหล่งเดียว อัตราการลดลงของสีต่ำกว่าเมื่อมีกลูโคสความเข้มข้น 1000 มก./ล. เป็นแหล่งคาร์บอนเพิ่มอีกแหล่งหนึ่งด้วย อย่างมาก
- เมื่อมีไนเตรตความเข้มข้น 1 mM., 5 mM. และ 10 mM. ในขวดทดลองที่มีสี C.I.Reactive Red 141 เข้มข้น 100 มก./ล. จะทำให้เวลาเริ่มต้นของการลดสีในกระบวนการแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้น คือสภาวะที่ไม่มีไนเตรตจะเกิดการลดสีในชั่วโมงที่หนึ่ง เมื่อปริมาณไนเตรตเพิ่มขึ้น เวลาเริ่มต้นที่จะเกิดการลดสีคือชั่วโมงที่ 4, 10 และ 23 ตามลำดับ
- ในการทดลองที่คล้ายกันเพียงแต่เปลี่ยนจากการใช้ไนเตรตเป็นซัลเฟตปรากฏว่าไม่เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพอจะนำมาสรุปได้ว่าความสามารถในการเป็นตัวรีดิวซ์อิเล็กตรอน เรียงตามลำดับได้ดังนี้ ไนเตรต > C.I.Reactive Red 141 > ซัลเฟต
- ค่าไออาร์พีที่ทำการวัดระหว่างกระบวนการแอนแอโรบิก เปรียบเทียบระหว่างขวดที่มีสีอย่างเดียว ขวดที่มีการเติมไนเตรต และขวดที่มีการเติมซัลเฟต ขวดที่มีสีอย่างเดียวกับขวดที่เติมซัลเฟตลักษณะกราฟของค่าไออาร์พีที่ได้ไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก แต่ขวดที่มีการเติมไนเตรต ค่าไออาร์พีจะปรับ

ระดับสูงขึ้นไปประมาณ -225 mV. ช่วงนี้แทบจะไม่มี การลดลงของสีเลย หลังจากนั้นค่าโออาร์พีจะลดลงอย่างรวดเร็ว พร้อมๆกับการลดลงของสีอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่ากระบวนการกำจัดสีที่เกิดขึ้น จะเกิดในช่วงค่าโออาร์พีหนึ่งๆเท่านั้น และเมื่อค่าโออาร์พีอยู่นอกช่วงนี้ ก็อาจบอกได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากำลังถูกรบกวน

- เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายของสี C.I.Reactive Red 141 โดยกระบวนการแอนแอรอริก โดยใช้ column chromatography ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้ NMR (Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy) พบว่าโครงสร้างของสีถูกทำลายได้ไม่หมด เป็นเพียงการสลายพันธะโคพันธะหนึ่งให้โครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่แตกออกเป็น ส่วนๆเท่านั้น
- จุดชีพที่เลี้ยงให้เคยชินกับน้ำเสียสามารถรับสภาพน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 100 มก./ล. ได้ดีกว่าจุดชีพที่ไม่ได้มีการปรับชินสภาพอย่างเห็นได้ชัด สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มก./ล. ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างจุดชีพทั้งสองชนิด

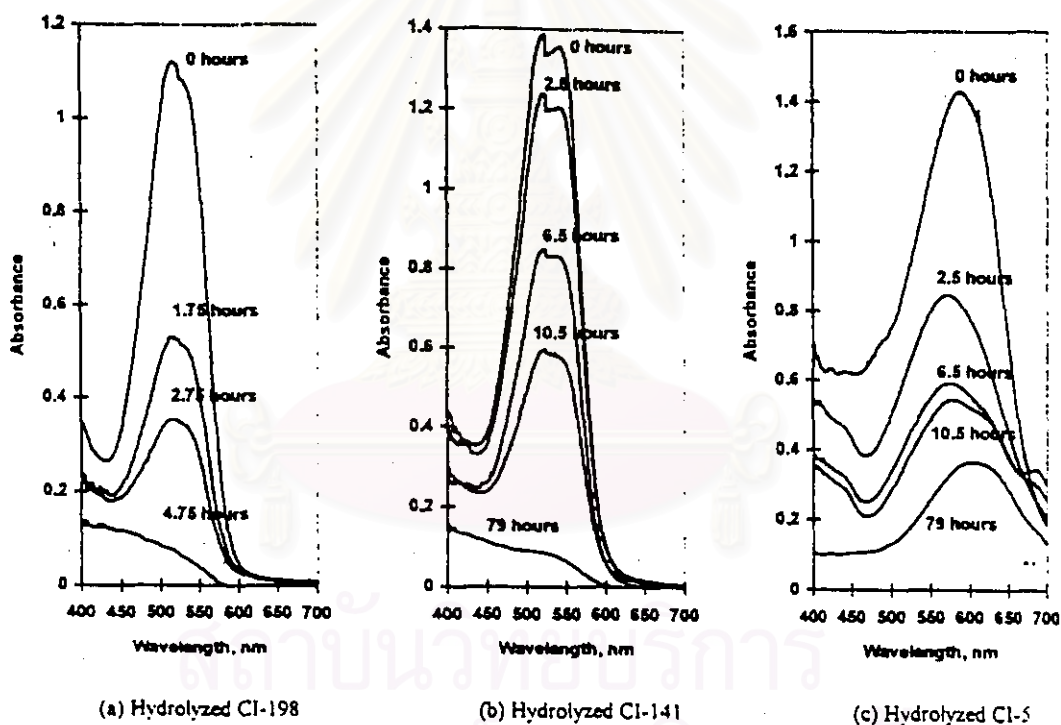
Nigam, P และคณะ (1996) ได้ศึกษาการลดของสีจากโรงงานอุตสาหกรรมการย้อมผ้า ในหลายชนิดของโครงสร้างสี โดยทำการทดลองในสภาวะแอนแอรอริก วัดการลดของค่าแอมป์-ซอบแบนซ์ที่ λ_{max} ของสีแต่ละชนิด ที่เวลาบ่ม 24 ชม. อุณหภูมิ 26 °ซ และใช้ Yeast Extract ปริมาณ 5 ก./ล. เป็นแหล่งคาร์บอน ในการทดลองนี้ได้เพิ่มความเข้มข้นสีเริ่มต้นที่ 0.5 มก./ล. ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า สีชนิด Remazol Black B ที่ทำการวัดค่าแอมป์ซอบแบนซ์ที่ 600 นาโนเมตรนั้นสามารถลดสีได้ร้อยละ 67 ภายใน 24 ชม.

Setiadi, T และ M.V. Loosdrech (1997) ได้ศึกษาความสามารถของระบบแอนแอรอริก ในการลดสีย้อมรีแอคทีฟชนิดอะโซที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน โดยสีที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ CI-198 (Remazol Red RB) CI-141 (Reactive Red) และ CI-5 (Remazol Black B) ในการทดลองได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 37 °ซ และความเข้มข้นสีเริ่มต้น 100 มก./ล. ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียด้านบนที่มาจากการหมუნเหวียงเพื่อกำจัดเอสเอสแล้วนำมาวัดค่าแอมป์ซอบแบนซ์ที่ λ_{max} ของสีแต่ละชนิด คือที่ 525 520 และ 595 นาโนเมตรสำหรับสี CI-198, CI-141 และ CI-5 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าระบบสามารถย่อยสี CI-198 ได้ถึงร้อยละ 87 ภายในเวลา 3.75 ชั่วโมง ในขณะที่สี CI-141 และ CI-5 นั้นสีลดได้ร้อยละ 65 ในเวลา 10.5 ชั่วโมง และเมื่อให้เวลาในการย่อยสีต่อไป พบว่าสี CI-198 สามารถเกิดการลดของสีได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อ

เวลาผ่านไป 4.75 ถึง 6.75 ชั่วโมง ส่วนสี CI-141 ก็ใช้เวลา 72 ถึง 79 ชม.ในการลดสีอย่างสมบูรณ์ แต่สำหรับสี CI-5 นั้นอัตราการลดของสีจะเกิดได้อย่างรวดเร็วใน 3 ชั่วโมงแรกเท่านั้น เมื่อปล่อยจนเวลาผ่านไปถึง 79 ชั่วโมง สีก็ยังคงไม่เกิดการลดอย่างสมบูรณ์ ซึ่งพบว่าที่เวลา 72 ถึง 79 ชั่วโมงนั้นได้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีฟ้าม่วงเป็นสีฟ้าขาว โดยที่ค่าแอมซอมแบนซ์ของโทนสีทั้งสองที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เพียงแตกต่างกันที่ จุดที่เกิด λ_{max} ขยับไปทางขวามือจาก 570 เป็น 605 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.9

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการลดสีของสีชนิด CI-198 และ CI-141 นั้นเป็นการลดได้ภายในขั้นตอนเดียว กล่าวคือเป็นโครงสร้างสีเดี่ยว ส่วนสี CI-5 นั้นประกอบไปด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนมากมาย



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของสีที่ใช้ในการทดลองที่เวลาบ่มต่างกัน