บทที่ 2

ทฤษฎี และแนวความคิด

2.1 สีย้อม (dyes)

สีย้อมผ้า เป็นวิวัฒนาการในการปรุงแต่งเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มของมนุษย์ ให้มีความสวยงามมากขึ้น นอกเหนือจากการนุ่งห่มเพื่อปกปิดและให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย ในยุคแรก สีย้อมผ้าทำมาจากสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่นลูกมะเกลือ แล้วนำผ้าไปคลุกเคล้าหรือแช่ให้สีติดมาในเนื้อผ้า ต่อมาเมื่อจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น มีการใช้ผ้ามากขึ้น การย้อมด้วยสีธรรมชาติแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้ทันตามความต้องการใช้งาน อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องคุณภาพของผ้าที่ย้อมแล้ว สีย้อมไม่คงทน ไม่มีสีให้เลือกมากนัก ผ้าที่ย้อมได้โทนสีไม่สดใส จึงมีผู้หาทางผลิตสีย้อมจากสารประเภทไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคต่างๆ และพัฒนากระบวนการย้อมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของแต่ละบริษัท แต่ไม่ว่าอย่างไรล้วนมีจุดประสงค์เดียวกันคือ สีย้อมผ้าที่ได้มีความคงทน ไม่ซีดจางเมื่อใช้งานไปนานๆ ย้อมติดผ้าได้ง่าย ใช้น้ำน้อย ต้นทุนในการย้อมต่ำ

2.1.1 การมองเห็นสี

มนุษย์สามารถมองเห็นแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร หากวัตถุสะท้อนคลื่นแสงทั้งหมดมาเข้าตา มนุษย์จะมองเห็นเป็นสีขาว หากดูดกลืนไว้ได้ทั้งหมดจะมองเห็นเป็นสีดำ ถ้าดูดกลืนไว้บางส่วนก็จะมองเห็นเป็นสีต่างๆ ในกรณีของสีย้อมผ้า การที่สีย้อมทำให้ผ้าสีขาวมองเห็นเป็นสีต่างๆได้นั้น เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมส่วนหนึ่งเข้าไปทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยผ้าไว้ แล้วมีกลุ่มอะตอมอีกกลุ่มหนึ่งดูดกลืนคลื่นแสงไว้บางส่วน ที่เหลือสะท้อนออกมาทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆ การย้อมผ้าให้ได้ผลดีมีสีสดสวยและคงทน จึงขึ้นอยู่กับการทำงานร่วมกันของส่วนแสดงสีและส่วนยึดติดกับเส้นใย กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่ดูดกลืนคลื่นแสงไว้บางส่วนแล้วสะท้อนออกมาบางส่วน ทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆ นั้นเรียกว่า ส่วนแสดงสี หรือโครโมฟอร์ (Chromophores) และมีการแบ่งเรียกย่อยลงไปตามกลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีนั้นเช่น ถ้ามีพันธะคู่ของไนโตรเจน (-N=N-) เรียกว่ากลุ่มอะโซ (azo) ถ้ามีพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) เรียกว่ากลุ่มเอททิลีน (ethylene) เป็นต้น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 การจำแนกสีย้อม (อัจฉราพร ไทฉะสูตร, 2527)

สีย้อมผ้า แบ่งออกตามลักษณะการนำมาใช้งาน ได้แก่

1) สีเบสิค (Basic dyes)
2) สีแอสิค (Acid dyes)
3) สีมอแดนท์ และพรีเมตัลไลซ์ (Mordant and premetallized dyes)
4) สีไดเรกท์ (Direct dyes)
5) สีดีสเพอร์ส (Disperse dyes)
6) สีอะโซอิค (Azoic dyes)
7) สีวัต (Vat dyes)
8) สีกำมะถัน (Sulfur or sulphide dyes)
9) สีออกซิไดซ์ (Oxidation colorants)
10) สีโอเนียม (Onium dyes)
11) สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes)
12) สีปิกเมนต์ที่ใช้กับเรซิน (Pigment-resin binder system)
13) สีโลหะ (Metallic dyes)

2.1.3 การนำสีย้อมผ้าไปใช้งาน

หลังจากทราบถึงกลไกการแสดงสีของสีย้อมต่างๆแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหาทางทำให้สีย้อมติดกับเส้นใยหรือเนื้อผ้า ดังนั้นสีย้อมแบบรีแอกทีฟจะต้องประกอบไปด้วยส่วนการทำงานหลัก 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนแสดงสี ได้แก่กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ดังกล่าวมาแล้ว ส่วนที่สองคือส่วนที่ทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใย เรียกว่ากลุ่มอะตอมออกโซโครม (auxochromes) อันได้แก่ OH NH_2 NHR NR_2 SO_3 และ COOH โมเลกุลใดที่มีส่วนแสดงสี แต่ขาดกลุ่มอะตอมออกโซโครมก็สามารถมองเห็นเป็นสีต่างๆ ได้ แต่จะนำมาย้อมผ้าไม่ติด เรียกกลุ่มโมเลกุลนั้นว่า โครมาเจน (chromagen)

วิธีการทำให้สีย้อมผ้ายึดติดกับเส้นใยอย่างทั่วถึงต้องอาศัยตัวกลางพาโมเลกุลสีเข้าสัมผัสกับเส้นใยให้ได้มากที่สุด ทำได้โดยละลายผงสีย้อมในตัวทำละลาย แล้วนำเส้นใยผ้าจุ่มลงในสารละลายนั้น ปล่อยให้กลุ่มอะตอมออกโซโครมทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใย เมื่อนำผ้าขึ้นมาก็จะได้ผ้าสีตามต้องการ การย้อมผ้าตามอุดมคติคือเมื่อแช่ผ้าลงในสารละลายที่มีสีย้อม หลังจากนำผ้าขึ้นมาแล้ว สีย้อมทั้งหมดต้องติดมากับเส้นใยผ้าเหลือแต่ตัวทำละลายบริสุทธิ์อยู่ในถังย้อม

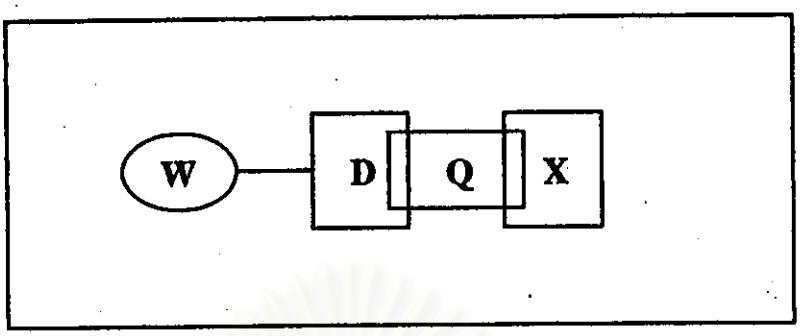
น้ำเป็นตัวทำละลายที่หาได้ง่ายและราคาถูกที่สุด ผู้ผลิตสีทั้งหลายจึงคิดค้นหาทางทำให้สีย้อมละลายน้ำได้ดี เพื่อใช้น้ำในกระบวนการย้อมได้ ช่วยลดต้นทุนการย้อมผ้า แต่ปัญหาที่ตามมาคือ การที่สีย้อมละลายน้ำได้ เมื่อนำผ้าที่ย้อมสีแล้วไปซักสีจะละลายกลับออกมา ทำให้ผ้าสีซีดจางลง วิธีการแก้ปัญหานี้ทำได้โดยเลือกใช้กลุ่มอะตอมออกโซโครมที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยแบบไปทางเดียว หลังจากที่ยึดติดกับเส้นใยแล้วปฏิกิริยาไม่ผันกลับไปละลายน้ำได้อีก และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูง ในกระบวนการย้อมผ้าจึงมักมีขั้นตอนการต้มรวมอยู่ด้วย การที่สีย้อมจะยึดติดกันเส้นใยได้ดี สีย้อมต้องมีความสามารถยึดติดกับเส้นใยมากกว่าละลายอยู่กับน้ำ ถ้าเป็นพันธะเคมีโควาเลนท์ (covalent bond) จะแข็งแรงที่สุด และยังขึ้นกับขนาด รูปร่างโมเลกุลของสีย้อม ถ้าโมเลกุลสีย้อมมีขนาดเล็กและรูปร่างยาวจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ดีกว่าโมเลกุลสีย้อมขนาดใหญ่ มีโอกาสทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง สีละลายกลับเมื่อนำไปซักได้น้อยลง

ปัญหาอีกประการหนึ่งคือ หลังจากย้อมผ้าแล้วยังคงเหลือสีในน้ำย้อมผ้า เนื่องจากสมบัติความสามารถในการละลายได้ของสีในน้ำ เมื่อนำผ้าชุดใหม่ลงแช่น้ำย้อมอีกสีก็ไม่หมดไป ต้องปล่อยน้ำส่วนนี้ทิ้ง และมีการบำบัดก่อนระบายออกสู่แหล่งรับน้ำตามธรรมชาติ

2.1.4 สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เช่น ผ้าฝ้าย โมเลกุลสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่เสมือนเป็นส่วนหนึ่งของเส้นใย ไม่ใช่การเคลือบทับอยู่ภายนอก ผ้าที่ย้อมด้วยสีรีแอกทีฟจึงมีสีคงทนไม่ซีดจางแม้ผ่านการซักหลายครั้ง ความหมายตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทย สีรีแอกทีฟหมายถึงสีย้อมซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีเกิดพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) กับเส้นใยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2530)

ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ ประกอบด้วยกลุ่มเคมีดังนี้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบโครงสร้างสีรีแอกทีฟ

W คือ กลุ่มที่ละลายน้ำได้ดี โดยทั่วไปเป็นพวกซัลโฟนิก ($-SO_2Na$)

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆ (chromophore) แต่ลำพังกลุ่ม D กลุ่มเดียวไม่สามารถย้อมติดเส้นใยได้ กลุ่มนี้เรียกว่ากลุ่มแสดงสี หรือโครโมฟอร์

Q คือ กลุ่มอะตอมที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย (X) และกลุ่มแสดงสี (D) เข้าด้วยกัน เช่นกลุ่ม -NH- -NHCO- $-SO_2-$ $-NHSO_2-$ และ $-NCH_3-$ เป็นต้น

X คือ กลุ่มที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย (reactive group) เพื่อสร้างเป็น Cross link compound ยึดติดกับเส้นใยผ้า

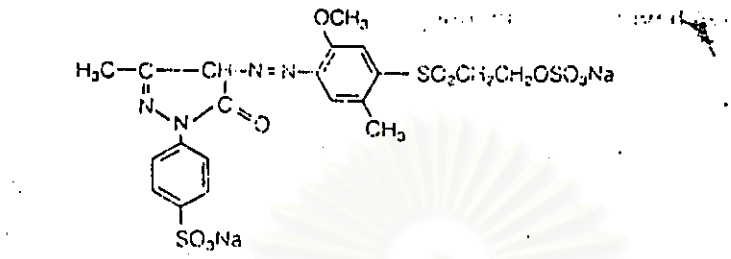
สีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มเคมีที่ร่วมกันทำงานหลายกลุ่ม แม้ว่าสีบางชนิดส่วนแสดงสีสามารถเชื่อมต่อกับส่วนที่ทำหน้าที่ยึดเกาะกับเส้นใยได้โดยตรงไม่ต้องอาศัยตัวกลางเชื่อมต่อ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงสีย้อมรีแอกทีฟ จึงให้ความสนใจไปที่กลุ่มอะตอม 2 ชนิดคือ

1. ส่วนแสดงสี
2. ส่วนทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยผ้า

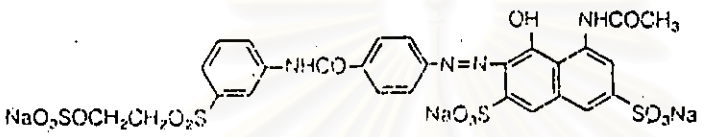
2.1.4.1 กลุ่มอะตอมที่เป็นส่วนแสดงสีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มอะตอมที่เป็นส่วนแสดงสีของสีรีแอกทีฟ มีสูตรโครงสร้างเคมีต่างๆกัน สามารถแบ่งตามโครงสร้างได้หลายกลุ่ม ดังนี้ (Sumitomo Chemical Co., ltd.)

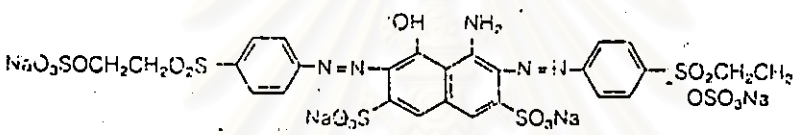
1) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก ดังรูปที่ 2.2 เป็นกลุ่มที่มีการใช้มากที่สุด



Pyrazoron type
(Yellow)



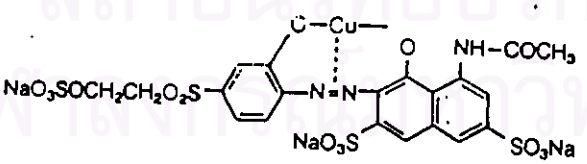
H-Acid type
(Red)



H-Acid type
(Navy-Black)

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Unmetallised Azo

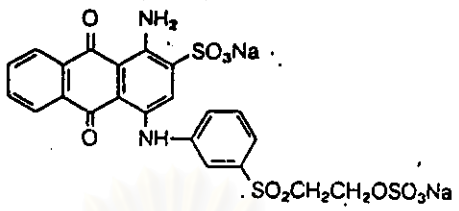
2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก ดังรูป 2.3



H-Acid type
(Red, Violet-Blue)

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Metal-Complex Azo

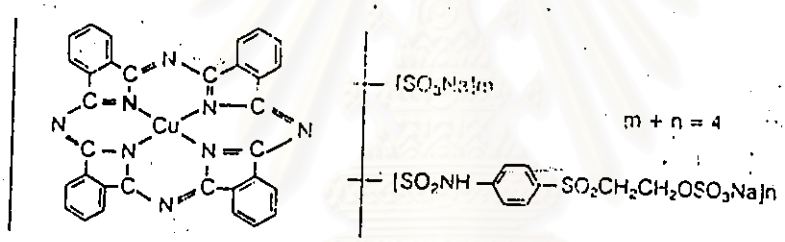
3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก ดังรูป 2.4



(Blue)

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Anthraquinone

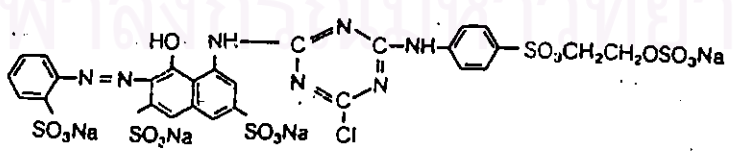
4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก ดังรูป 2.5



(Turquoise Blue)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Phthalocyanine

5) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลักในสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ดังรูปที่ 2.6



(Red)

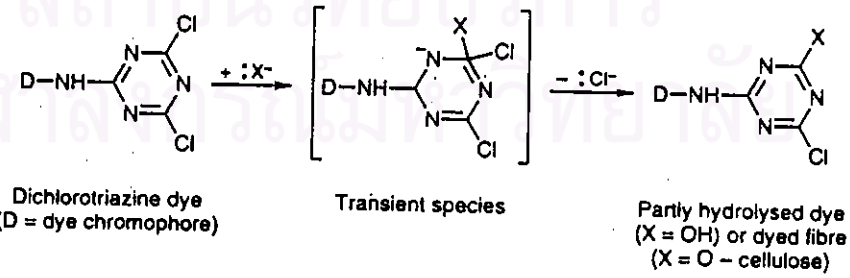
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสีรีแอกทีฟแบบ Bifunctional ที่มีกลุ่มโครโมฟอร์เป็นแบบ Azo

สีรีแอกทีฟใช้กลุ่มอะตอมที่เป็นส่วนแสดงสีประเภทเอโซ (Unmetallised Azo และ Metal-Complex Azo) สูงถึงร้อยละ 81 (Shore, 1990) ดังนั้นบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมรีแอกทีฟจึงมุ่งไปที่การบำบัดสีย้อมประเภทอะโซรีแอกทีฟ โดยต้องหาทางทำลายโครงสร้างส่วนแสดงสีนี้ให้กลายเป็นโมเลกุลย่อยละลายปนอยู่กับน้ำ แต่ไม่แสดงสีออกมา ช่วยลดผลกระทบต่อแหล่งรับน้ำทิ้งในด้านมีสีเป็นที่น่ารังเกียจและบดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ การกำจัดสีย้อมโดยการหาทางแยกโมเลกุลสีย้อมออกจากน้ำโดยตรงทำได้ยาก เนื่องจากสีรีแอกทีฟละลายน้ำได้ดีมาก

2.1.4.2 กลุ่มอะตอมที่เข้าทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยของสีรีแอกทีฟ

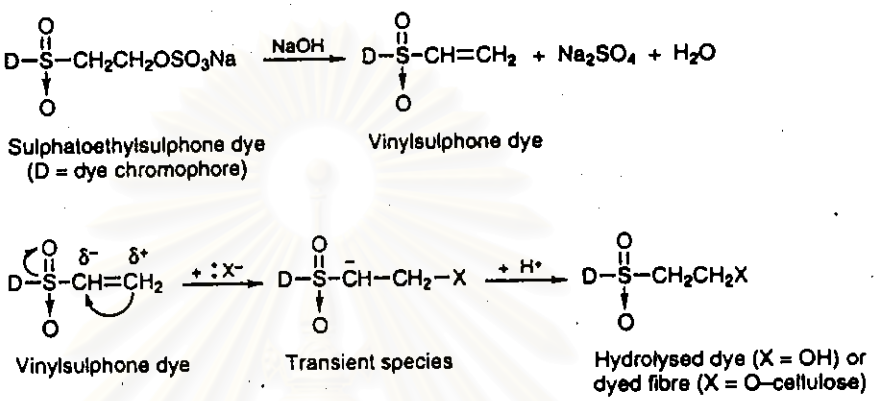
กลุ่มโมเลกุลสำคัญอีกกลุ่มหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพความคงทนของสีผ้าที่ผ่านการย้อม นอกจากส่วนแสดงสี ได้แก่กลุ่มที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย ถ้าการทำปฏิกิริยาดี โมเลกุลส่วนแสดงสีจับกับเส้นใยเหนียวแน่น ผ้าจะมีสีคงทนซักแล้วสีไม่ซีดจาง สีรีแอกทีฟมีข้อดีกว่าสีประเภทอื่นๆ ที่กลไกการยึดจับกับเส้นใยผ้าเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสีและเส้นใยเซลลูโลสด้วยกลุ่มโมเลกุลส่วนทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยผ้า (reactive group) ทำให้สามารถย้อมติดผ้าฝ้ายได้ดี เป็นที่มาของการเรียกสีย้อมรีแอกทีฟ การเข้าทำปฏิกิริยาของกลุ่มรีแอกทีฟกับเส้นใยเซลลูโลส แบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1) กลุ่มรีแอกทีฟของสีเข้าจับกับโมเลกุลของเส้นใย โดยการแทนที่อะตอมพวกฮาโลเจนในโมเลกุลสีด้วยไฮดรอกไซด์อิออน หรือเส้นใย เรียกการเข้าทำปฏิกิริยาแบบนี้ว่า Nucleophilic Substitution ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution (Shore,1995)

2) กลุ่มรีแอกทีฟของสีเข้าจับกับโมเลกุลของเส้นใย โดยแตกพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอมในกลุ่มไวนิลซัลโฟน (vinysulphone) ของโมเลกุลสีออก แล้วคาร์บอนตัวสุดท้ายในกลุ่มทำปฏิกิริยาสร้างพันธะกับเส้นใยหรือกลุ่มไฮดรอกไซด์อิออน เรียกว่าปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition (Shore,1995)

กลุ่มรีแอกทีฟสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งกับเส้นใย และกับไฮดรอกไซด์อิออน แต่การทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์อิออนเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ในการย้อมผ้า เพราะสีส่วนนี้จะหมดความสามารถในการยึดเกาะกับเส้นใยได้อีก กลายเป็นสีตกค้างเหลือปะปนไปกับน้ำทิ้ง สิ้นเปลืองสีย้อมมากขึ้น เพิ่มภาระให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย กลุ่มรีแอกทีฟที่ดีต้องสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้เร็วกว่าการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์อิออน และหลังจากยึดติดกับเส้นใยแล้วต้องไม่ละลายกลับมาได้อีก ในกระบวนการย้อมผ้าด้วยสีแต่ละประเภทจึงมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างกันเพื่อเหตุผลดังกล่าว

ได้มีการคิดค้นกลุ่มรีแอกทีฟขึ้นมาใช้หลายแบบ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามจำนวนกลุ่มที่เข้าทำปฏิกิริยาในโมเลกุลสี 1 โมเลกุล คือ

1) กลุ่มที่มีส่วนเข้าทำปฏิกิริยาเพียงกลุ่มเดียว (monofunctional)

2) กลุ่มที่มีส่วนเข้าทำปฏิกิริยาสองกลุ่ม (bifunctional)

ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มรีแอกทีฟต่างๆและชื่อทางการค้ารวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กลุ่มรีแอกทีฟที่สำคัญ (Shore, 1995)

กลุ่มรีแอกทีฟ	ชื่อการค้า
Monofunctional	
Dichlorotriazine	Procion MX (Zeneca)
Aminochlorotriazine	Procion H (Zeneca)
Aminofluorotriazine	Cibacron F (CGY)
Trichloropyrimidine	Drimarene X (S)
Chlorodifluoropyrimidine	Drimarene K (S)
Dichloroquinoxaline	Levafix E (BAY)
Sulphatoethylsulphone	Remazol (HOE)
Sulphatoethylsulphonamide	Remazol D (HOE)
Bifunctional	
Bis(aminochlorotriazine)	Procion H-E (Zeneca)
Bis(aminonicotinotriazine)	Kayacelon React (KYK)
Aminochlorotriazine-sulphatoethylsulphone	Sumifix Supra (NSK)
Aminofluorotriazine-sulphatoethylsulphone	Cibacron C (CGY)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.5 กระบวนการย้อมผ้าฝ้าย

ผ้าฝ้ายเป็นกลุ่มเส้นใยหลักในการนำมาตัดเย็บเสื้อผ้ามากถึงร้อยละ 70 ของเส้นใยทั้งหมด ใยฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติ มีส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างหลักคือเซลลูโลส การย้อมผ้าฝ้ายต้องใช้สีย้อมแบบรีแอกทีฟ เพื่อให้สีทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยเซลลูโลสอยู่ได้ งานบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่จึงมุ่งไปที่การบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ ซึ่งน้ำเสียไม่ได้มีเพียงสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบจากสีย้อมเท่านั้น ยังมีสารเคมีต่างๆ จากการใช้สารช่วยย้อมและที่เหลือมาจากขั้นตอนการเตรียมเส้นใยก่อนย้อม กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการย้อมผ้าฝ้ายมีดังนี้

2.1.5.1 การเตรียมเส้นใยก่อนย้อม

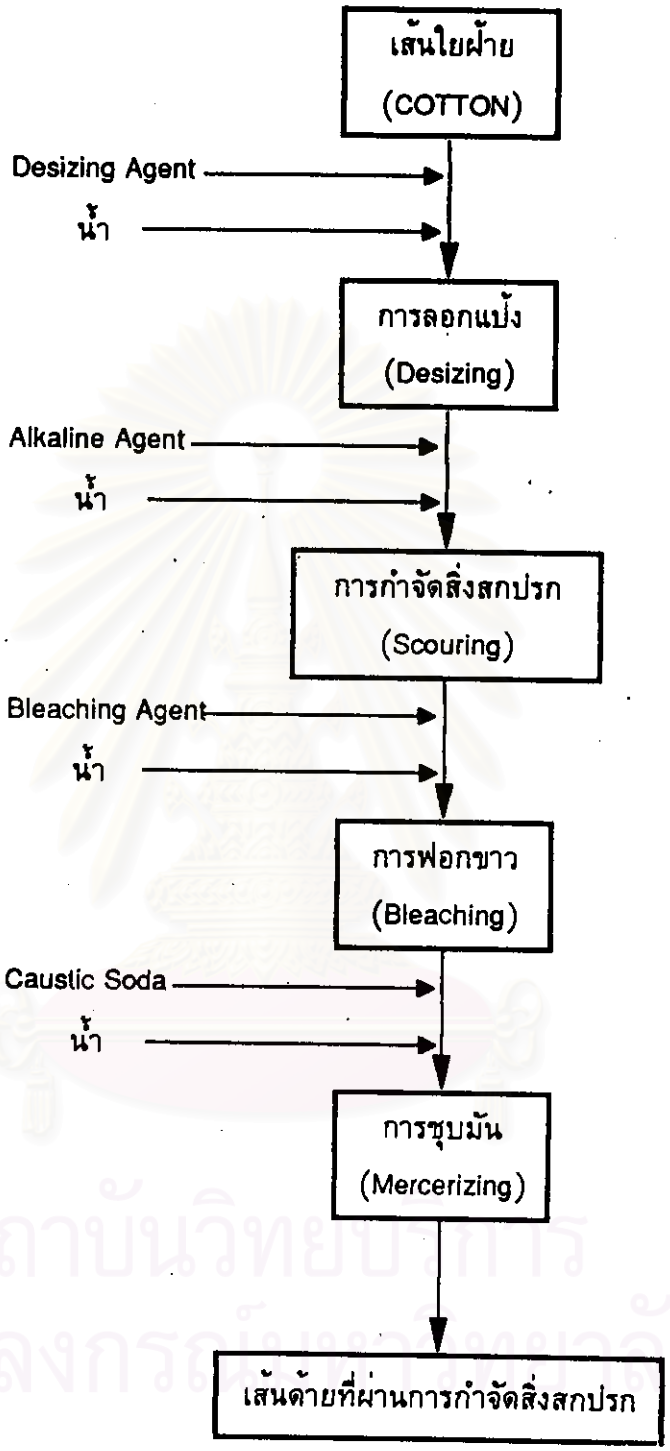
การย้อมผ้าในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นการย้อมเส้นใยด้ายให้เป็นสีต่างๆตามต้องการ จากนั้นจึงนำด้ายไปทอเป็นผ้าผืนสำหรับการตัดเย็บ ใยฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีสิ่งสกปรกเจือปนมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยจากโรงงานปั่นด้ายสิ่งปนเปื้อนอยู่มาก เช่นแป้งจากกระบวนการลงแป้งด้ายยืน สีธรรมชาติ กาว ขี้ฝุ้น ฯลฯ ทำให้สีย้อมไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้อย่างทั่วถึง เกิดเป็นรอยด่าง หรือสีติดไม่ทน ดังนั้นก่อนการย้อมต้องเตรียมเส้นด้ายตามขั้นตอนหลักดังนี้ (รูปที่ 2.9)

1. การลอกแป้ง (Desizing)

ในกระบวนการปั่นด้วยจะมีการใช้แป้งเพื่อให้เส้นด้ายแข็ง ลื่น ไม่พันกัน ก่อนการย้อมต้องกำจัดแป้งส่วนนี้ให้เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้หรือสลายตัวไปเพื่อให้การทำความสะอาดและการฟอกขาวในขั้นตอนต่อไปได้ผลดี โดยนำเส้นใยลงต้มกับสารช่วยย่อย (enzyme agent) สารเคมีออกซิไดซ์ (oxidising agent) หรือใช้น้ำสบู่ ถ้าต้องการให้เส้นใยขาวสะอาด สีสามารถซึมทะลุเข้าภายในเส้นใยได้มากขึ้น ควรนำผ้าไปผ่านสารละลายกรดกำมะถันเจือจาง เป็นการช่วยทำความสะอาดอีกขั้นหนึ่ง ในบางกรณีอาจงดขั้นตอนการผ่านกรด (souring) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของผ้า

2. การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

เป็นขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่ติดมากับเส้นด้าย เช่น คราบน้ำมัน เศษดิน ฝุ่นผง ต่างๆ เหมือนการซักผ้าทั่วไป โดยใช้โซดาไฟ (NaOH) กับสบู่หรือผงซักฟอกใส่ลงในหม้อต้ม ช่วยขจัดคราบสกปรกต่างๆที่ยังฝังติดอยู่กับเส้นใย



รูปที่ 2.9 การเตรียมเส้นใยสำหรับการย้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การฟอกขาว (Bleaching)

เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของใยฝ้ายให้เป็นสีขาวก่อนการย้อม มิฉะนั้นสีธรรมชาติจะเป็นสีรองพื้น เมื่อนำไปย้อมทับด้วยสีอื่น ทำให้สีผิดเพี้ยนจากที่ต้องการ โดยเฉพาะหากย้อมด้วยสีอ่อน สารเคมีที่ใช้ส่วนมาก ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) โซเดียมคลอไรท์ ($NaClO_2$) หรือสารที่มีอำนาจออกซิไดซ์สูงอื่นๆ ขึ้นอยู่กับชนิดเส้นใย กระบวนการฟอก และคุณภาพเส้นด้ายที่ต้องการหลังการฟอกขาว

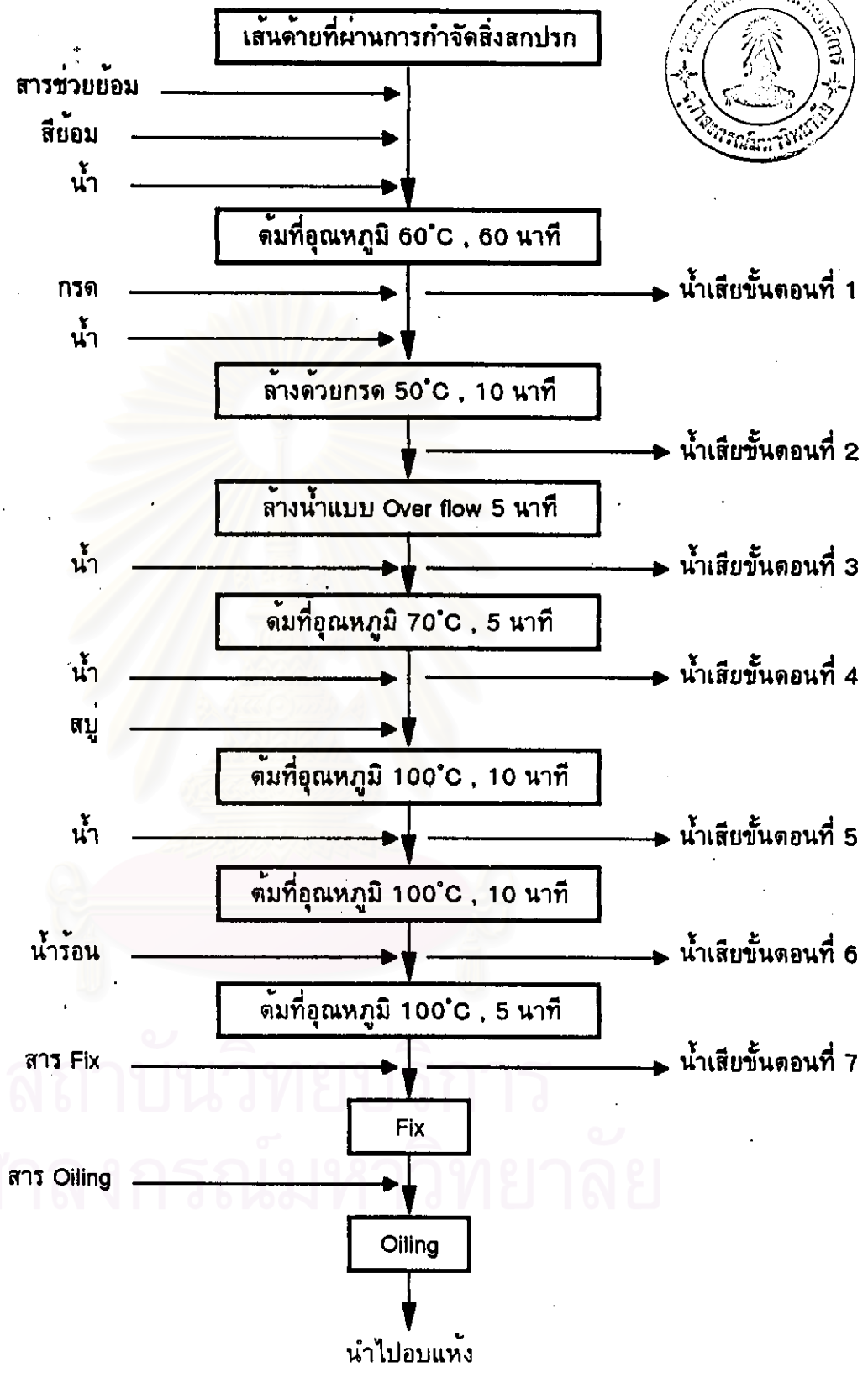
4. การชุบมัน (Mercerizing)

เป็นขั้นตอนเฉพาะสำหรับการเตรียมเส้นใยฝ้าย โดยการแช่เส้นใยไว้ในสารละลายโซดาไฟเข้มข้น (15-30%) พร้อมทั้งใส่แรงดึงไว้ หลังจากผ่านแรงดึงและล้างโซดาไฟออกแล้วคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป จากที่บิดเป็นเกลียวกลายเป็นเส้นตรงที่เรียบขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดสีย้อมของเส้นใย และทำให้เส้นใยเงางามขึ้น (เกษม, 2537) ถ้าแช่เส้นใยโดยปราศจากการใส่แรงดึงเรียกว่า การคอสติกไซซ์ (causticzing) เป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดสีย้อมแต่ไม่เพิ่มความเงา

2.1.5.2 การย้อมผ้าด้วยสีรีแอกทีฟ

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะใช้การย้อมแบบต่อเนื่อง (Continuous dying process) เพราะสีย้อมซึมเข้าเส้นใยได้ดี มีสีเข้ม และง่ายต่อการควบคุม ส่วนโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กจะใช้วิธีย้อมในหม้อย้อมหรือย้อมที่ละเท (Batchwise dying) เนื่องจากใช้อุปกรณ์น้อยกว่าระบบต่อเนื่อง แต่สามารถให้คุณภาพการย้อมได้ดี

น้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากน้ำย้อมจากขั้นตอนการย้อมครั้งที่ 1 ของโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่ง ซึ่งมีขั้นตอนการย้อมทั้งหมด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการย้อมและตกแต่งผ้า (โรงงานอุตสาหกรรมรามาเทคไทล์ จำกัด)

2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ หมายถึงปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนค่าเลขออกซิเดชัน (oxidation number) หรือเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเลกตรอน เมื่อมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันหรือมีการให้อิเลกตรอนเรียกว่าเกิดออกซิเดชัน เมื่อมีการลดเลขออกซิเดชันหรือมีการรับอิเลกตรอนเรียกว่ารีดักชัน(กฤษณา,2533) ทั้งสองปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันเมื่อมีการออกซิเดชันต้องมีรีดักชันปฏิกิริยาจึงจะสมบูรณ์ สารที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาคือ สารให้อิเลกตรอน (electron donor) และสารรับอิเลกตรอน (electron acceptor) ในระบบชีวเคมี ปฏิกิริยารีดอกซ์หมายความรวมไปถึงการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนอะตอมด้วย โดยมีการให้อิเลกตรอนผ่านอะตอมไฮโดรเจนกลายเป็นโปรตรอนหรือไฮโดรเจนอิออน (H^+) ในระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่สารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียจะเป็นตัวให้อิเลกตรอน ถ้าเป็นกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจนจุลชีพจะใช้ออกซิเจนอิสระเป็นสารรับอิเลกตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนในกระบวนการไร้ออกซิเจนจุลชีพจะใช้สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ออกซิเจนอิสระเป็นสารรับอิเลกตรอนแทน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรต ซัลเฟต และสารอินทรีย์บางชนิด ดังรูปที่ 2.11

สารที่เป็นตัวให้อิเลกตรอนจะมีสภาวะรีดิวซ์และพลังงานสูงกว่าสารที่มีสภาวะรีดิวซ์ต่ำหรือมีสภาวะออกซิไดซ์สูง เช่น คาร์บอน 6 อะตอม ในโมเลกุลกลูโคสจะมีสภาวะรีดิวซ์สูงมีพลังงานสะสมอยู่ในโมเลกุลมาก เมื่อสิ่งมีชีวิตย่อยกลูโคสจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำอย่างละ 6 โมเลกุลแล้วเท่ากับว่าอะตอมคาร์บอนเหล่านี้เปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ที่สูงขึ้นแต่พลังงานต่ำลง ดังแสดง

$$6O_2 + C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{พลังงาน}$$

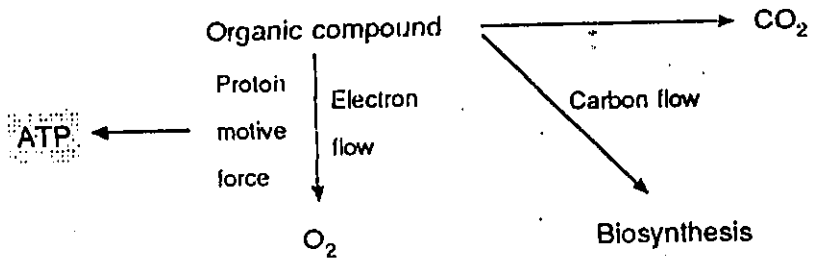
กลูโคส — พลังงานสูง

คาร์บอนไดออกไซด์ — พลังงานต่ำ

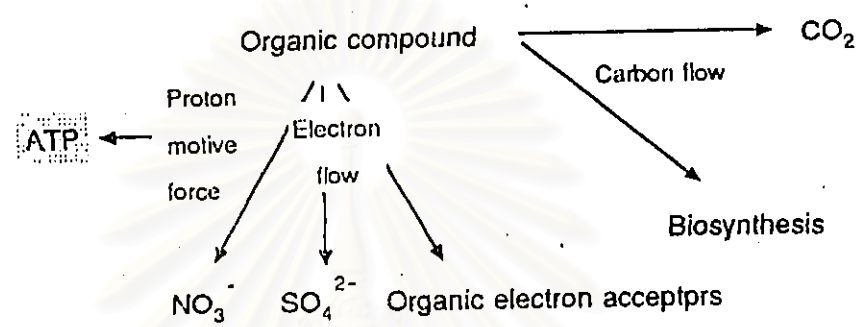
รับอิเลกตรอนจากกลูโคส

ในระหว่างปฏิกิริยา อิเลกตรอน 12 อิเลกตรอน ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับไฮโดรเจน 12 อะตอม ถ่ายเทจากกลูโคสไปสู่โมเลกุลออกซิเจน สร้างเป็นน้ำ 6 โมเลกุล เนื่องจากอิเลกตรอนถูกพาไปโดยไฮโดรเจน ดังนั้นกล่าวได้ว่า อิเลกตรอนไปอยู่ในโมเลกุลของสารที่มีไฮโดรเจน หากเปรียบเทียบระดับพลังงานกันแล้ว คาร์บอนไดออกไซด์มีพลังงานน้อยกว่ากลูโคสเพราะกลูโคสปล่อยพลังงานเคมีออกมามากในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

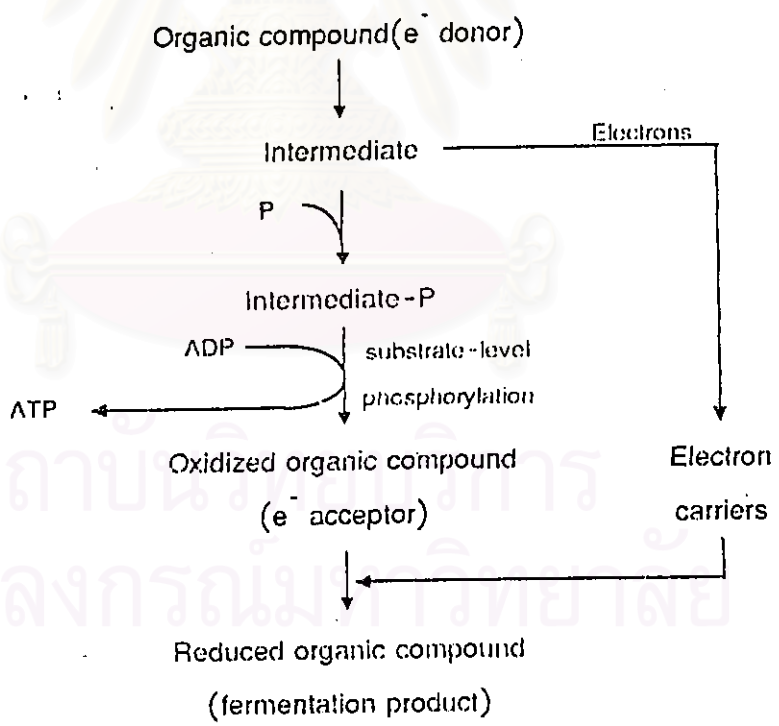
(ก) **Aerobic respiration**



(ข) **Anaerobic respiration**



กระบวนการหายใจ



กระบวนการหมัก

รูปที่ 2.11 วิถีของอิเลกตรอนและคาร์บอน ในกระบวนการหมักและการหายใจ

(Madigan et al., 1997)

2.2.1 การถ่ายเทอิเลกตรอน

การถ่ายเทอิเลกตรอนระหว่างสารคู่ปฏิกิริยาในระบบชีวเคมี อิเลกตรอนจะถูกส่งผ่านชั่วคราวให้กับพาหะขนส่งอิเลกตรอน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่อยู่เป็นอิสระในสารละลาย และกลุ่มที่ยึดอยู่กับเซลเมมเบรน

พาหะขนส่งอิเลกตรอนที่อยู่เป็นอิสระในสารละลาย มีอยู่ 3 ชนิดคือ

- NAD (nicotinamide adenine dinucleotide)
- NADP (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate)
- FAD (flavin adenine dinucleotide)

ปกติ NAD และ NADP ที่ยังไม่มีการรับอิเลกตรอน มักมีประจุบวกอยู่ก่อนแล้ว (NAD^+ และ $NADP^+$) เมื่อสารให้อิเลกตรอนปล่อยอิเลกตรอนออกมา 1 คู่ ในรูปไฮโดรเจนอะตอม (หมายถึงทั้งโปรตรอน และ อิเลกตรอน) สารพาหะแต่ละตัวจะเข้ารับอิเลกตรอน 1 คู่ จากไฮโดรเจน 2 อะตอมและรับโปรตรอนไว้ 1 ตัวด้วย กลายเป็นสารประกอบใหม่ที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบและไม่มีประจุ ส่วนโปรตรอนที่เหลืออีก 1 ตัว จะอยู่ในน้ำในรูปไฮโดรเจนอิออน เมื่อถูกรีดิวซ์แล้ว NAD และ NADP เปลี่ยนไปอยู่ในรูป NADH และ NADPH ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังสมการ

$$NAD^+ + 2H^+ - 2e \longleftrightarrow NADH \quad (+H^+ \text{ ในสารละลาย})$$

$$NADP^+ + 2H^+ - 2e \longleftrightarrow NADPH \quad (+H^+ \text{ ในสารละลาย})$$

ส่วน FAD จะรับอิเลกตรอนพร้อมกับโปรตอน 2 ตัว กลายเป็น $FADH_2$

เมื่อพาหะขนส่งอิเลกตรอนรับอิเลกตรอนแล้ว เปรียบเหมือนเป็นแหล่งให้อิเลกตรอนด้วย โดยพาหะแต่ละตัวทำงานในกระบวนการที่ต่างกัน เช่น พบ NAD ในกระบวนการย่อยสลายสารอาหารเพื่อสร้างพลังงาน ในขณะที่พบ NADH ในกระบวนการสังเคราะห์เซล เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

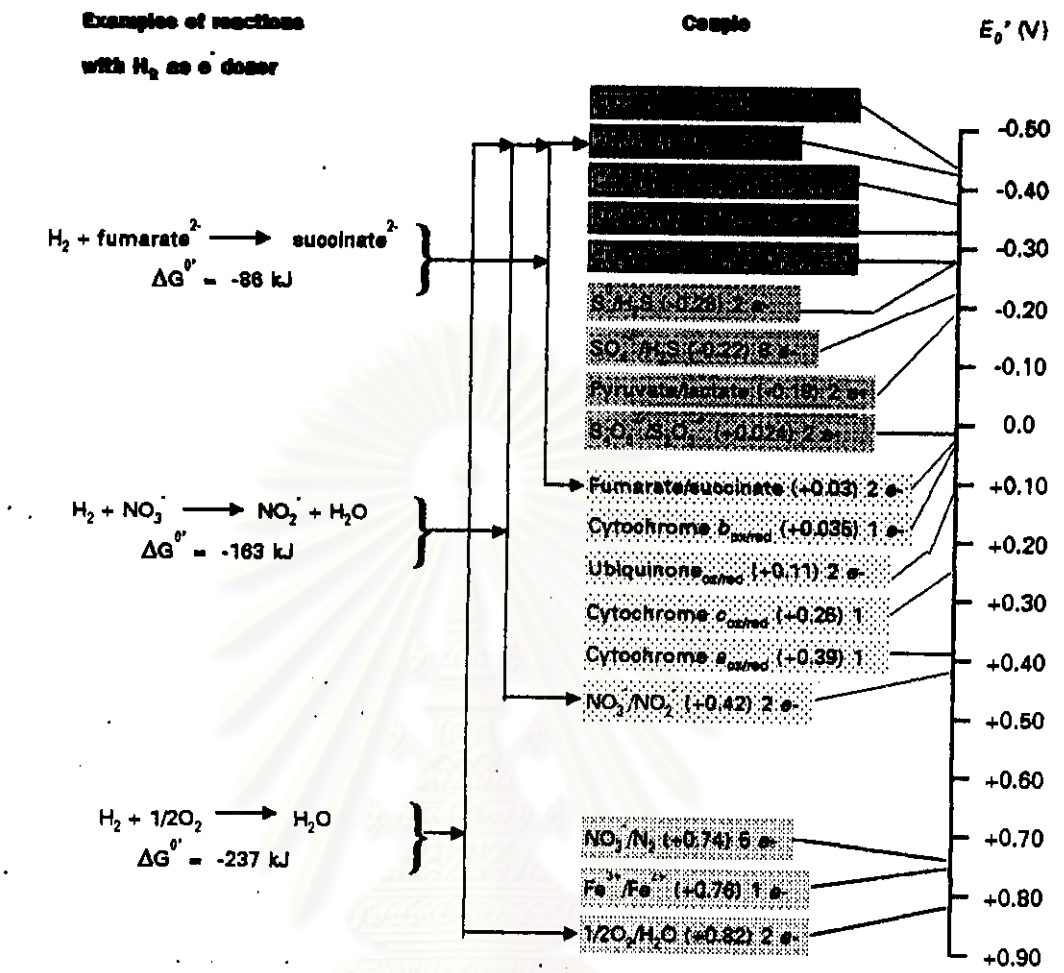
2.2.2 แนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน

การที่สารสองชนิดมีการถ่ายเทอิเลกตรอนให้แก่กันระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี แสดงว่ามีการไหลของอิเลกตรอนเกิดขึ้น การไหลของอิเลกตรอนเปรียบได้กับการไหลของน้ำ ที่ไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ ต่างกันที่การไหลของน้ำเป็นการไหลจากความต่างศักย์เนื่องจากแรงดึงดูดของโลกหรือความต่างระดับตามความสูงจากพื้นดิน แต่การไหลของอิเลกตรอนเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า

การระบุความต่างศักย์ของน้ำมักจะอ้างอิงด้วยความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน การระบุความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจึงต้องมีการอ้างอิงจากมาตรฐานเช่นเดียวกัน โดยเทียบกับเซลล์อ้างอิงไฮโดรเจน (รายละเอียดหัวข้อ 2.2.3 เรื่องค่าโออาร์พี) ดังนั้นครึ่งปฏิกิริยาของสารแต่ละชนิดจึงมีค่าความต่างศักย์มาตรฐานเมื่อเทียบกับเซลล์อ้างอิงไฮโดรเจนค่าหนึ่ง แต่เมื่อเทียบกับสารอื่นสารที่เคยเป็นตัวให้อิเลกตรอนเมื่อเทียบกับเซลล์อ้างอิงไฮโดรเจนอาจกลายเป็นตัวรับอิเลกตรอนเมื่อเทียบกับสารอื่นที่มีความสามารถในการให้อิเลกตรอนสูงกว่า สารส่วนใหญ่จึงเป็นได้ทั้งตัวให้อิเลกตรอนและตัวรับอิเลกตรอน ขึ้นอยู่กับสภาวะและสารคู่ปฏิกิริยา

เมื่อวัดค่าความต่างศักย์ของสารแต่ละชนิดเทียบกับเซลล์อ้างอิงไฮโดรเจน แล้วนำมาจัดเรียงตามลำดับ ให้สารที่มีศักย์เป็นลบมากที่สุดอยู่ด้านบน สารที่มีศักย์เป็นบวกอยู่ด้านล่าง จะได้ดังรูปที่ 2.12 ในกรณีที่มีสารหลายตัวเข้าร่วมในการทำปฏิกิริยาอิเลกตรอนมีแนวโน้มที่จะถ่ายเทระหว่างคู่สารที่มีความต่างศักย์ต่างกันมากๆ ความต่างศักย์รีดักชันระหว่างสารทั้งสองตัวเรียกว่า $\Delta E'_{o}$ ถ้าความต่างศักย์นี้ยิ่งมาก หมายถึงในการถ่ายเทอิเลกตรอนระหว่างสารทั้งสองมีการปล่อยพลังงานออกมามากเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 2.12 ออกซิเจนอยู่ด้านล่างสุดแสดงแนวโน้มเป็นตัวรับอิเลกตรอนที่ดีที่สุด มีความต่างศักย์มากที่สุด สิ่งมีชีวิตจึงเลือกใช้ออกซิเจนก่อน เพราะได้พลังงานออกมามากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 ค่าศักย์รีดักชั่นของครึ่งปฏิกิริยาต่างๆ (Madigan et al., 1997)

การบอกแนวโน้มในการให้หรือรับอิเลกตรอนของสารละลายอีกทางหนึ่ง คือบอกจากความดันอิเลกตรอน หลักการคล้ายกับการบอกปริมาณไฮโดรเจนอิออนด้วยค่าพีเอช

จากสมการ $Ox + ne \longrightarrow Red$

ค่าคงที่สมดุล $$K = \frac{[Red]}{[Ox][e]^n}$$

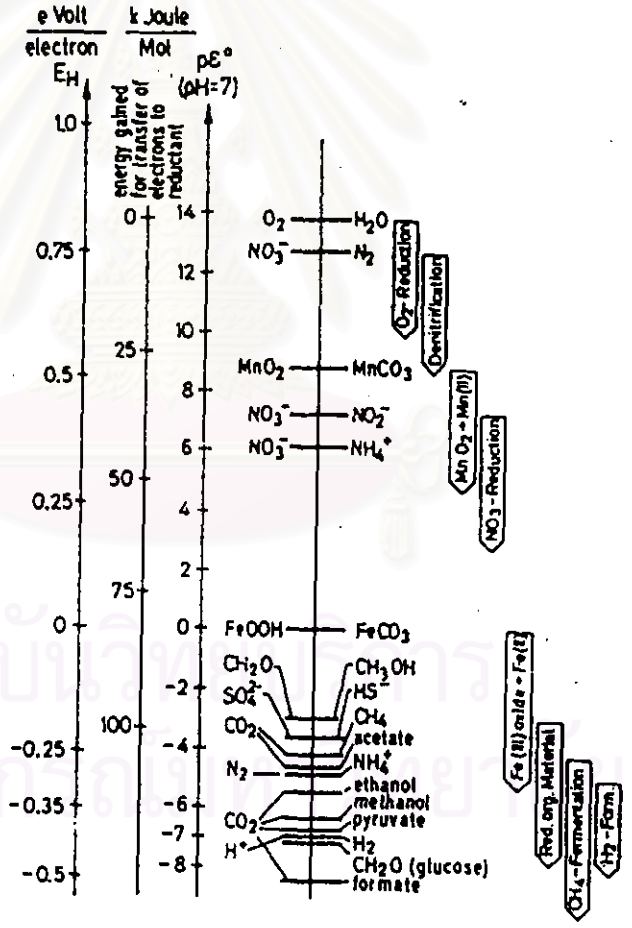
$$e = \left[\frac{1}{K} \frac{[Red]}{[Ox]} \right]^{1/n}$$

ถ้ากำหนดให้ $p\varepsilon = -\log [e]$

จะได้ $p\varepsilon = p\varepsilon^{\circ} + \frac{1}{n} \log \left[\frac{[Red]}{[Ox]} \right]$

เมื่อ $p\varepsilon^{\circ} = \frac{1}{n} \log K$

ถ้าค่า pε ต่ำหรือติดลบ แสดงว่ามีความดันอิเลกตรอนสูง มีแนวโน้มว่าสารนั้นจะเป็นตัวให้อิเลกตรอน ถ้าค่า pε สูง แสดงว่าสารนั้นมีแนวโน้มในการรับอิเลกตรอน เมื่อนำค่า $p\varepsilon^{\circ}$ ของปฏิกิริยาแต่ละชนิดมาเรียงลำดับจากสูงไปต่ำ ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระดับความต่างศักย์ของอมการครึ่งปฏิกิริยาที่สำคัญในระบบชีววิทยา

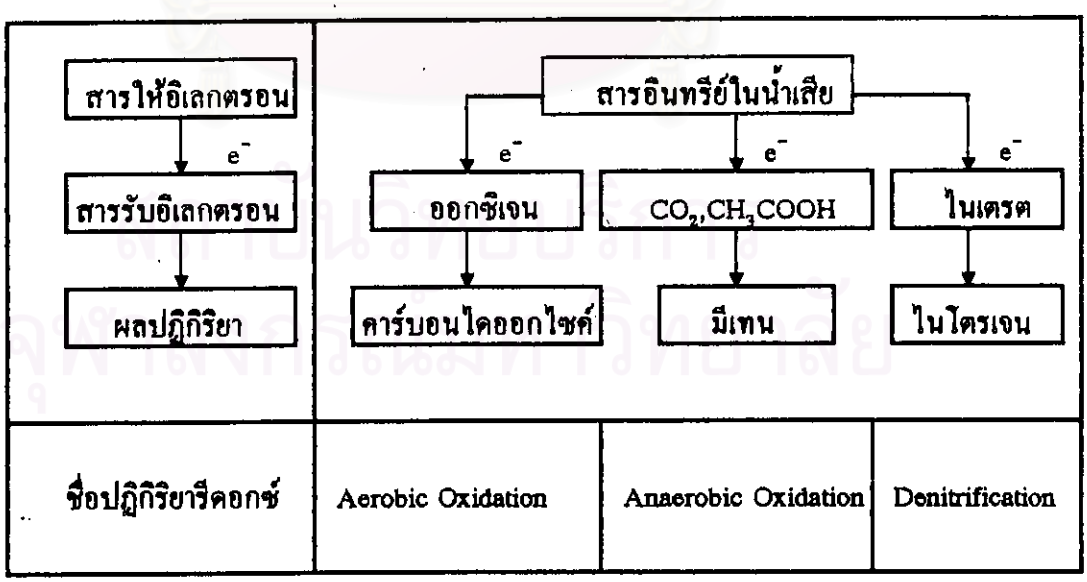
(Alexander et al., 1988)

2.3 กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

2.3.1 ลักษณะทั่วไป

กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสีย คือ ปฏิกิริยาเคมีที่มีการถ่ายเทอิเลกตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเลกตรอน (electron donor) และสารรับอิเลกตรอน (electron acceptor) หรือเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์

สารให้อิเลกตรอนในน้ำเสียจะเป็นพวกสารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียถือเป็นแหล่งพลังงานของจุลชีพ แต่สารรับอิเลกตรอนมีได้หลายชนิด และเกิดผลของปฏิกิริยาแตกต่างกัน ดังนั้นการจำแนกกระบวนการต่างๆ จึงพิจารณาที่สารรับอิเลกตรอนสุดท้าย ถ้าสารรับอิเลกตรอนสุดท้ายเป็นออกซิเจนเรียกว่า ปฏิกิริยาใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) ถ้าใช้สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ออกซิเจนอิสระ เช่นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก เป็นสารรับอิเลกตรอนแทน เรียกกระบวนการไร้ออกซิเจน(anaerobic respiration) และถ้าใช้สารอินทรีย์เป็นสารรับอิเลกตรอนเรียกว่าการหมัก (fermentation) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มั่นสิน,2536)

แต่ละกระบวนการมีลักษณะพิเศษเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป ตามลักษณะสมบัติทางชีวเคมี เช่นเมื่อเปรียบเทียบระบบใช้ออกซิเจนกับระบบไร้ออกซิเจน มีข้อแตกต่างที่จัดว่าเป็นข้อได้เปรียบของระบบไร้ออกซิเจนดังนี้

1) กระบวนการไร้ออกซิเจน ได้ก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์

2) มีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำมาก

3) สามารถย่อยสารอินทรีย์บางชนิดที่ระบบใช้ออกซิเจนย่อยได้ยากหรือย่อยไม่ได้ เช่น สีย้อมผ้าบางประเภท

4) ถ้านำกลไกพื้นฐานไปออกแบบสร้างเป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ระบบไร้ออกซิเจนจะมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำกว่าระบบใช้ออกซิเจน เนื่องจากไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ

5) สามารถรับน้ำเสียความเข้มข้นสูงมากกว่าระบบใช้อากาศ

6) ต้องการอาหารเสริม เช่น N, P น้อย

ข้อด้อยของกระบวนการไร้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการใช้ออกซิเจน คือ

1)ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมากได้

2) มีเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากต้องอาศัยการทำงานที่สอดคล้องกันของแบคทีเรียหลายชนิด หากชนิดใดชนิดหนึ่งผิดปกติ หรือทำงานไม่สอดคล้องกับชนิดอื่นแล้ว อาจทำให้ระบบโดยรวมมีปัญหาได้

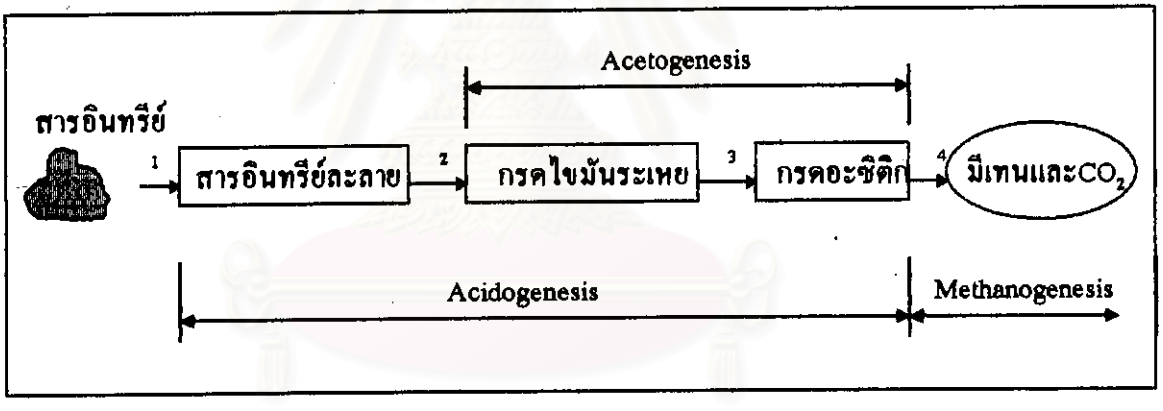
3) การเริ่มเดินระบบ(start up) ใช้เวลานาน

4)ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ระบบบำบัดที่เป็นกระบวนการไร้ออกซิเจนน้อยกว่ากระบวนการใช้ออกซิเจนมาก ส่วนใหญ่ใช้กระบวนการไร้ออกซิเจนเป็นระบบบำบัดขั้นต้น หรือระบบจัดการตะกอนสลัดจ์ การนำกระบวนการไร้ออกซิเจนรูปแบบต่างๆ เช่นระบบ UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเป็นกระบวนการหลักมีน้อย ทำให้เทคนิควิธีหรือความรู้ต่างๆ รวมถึงความมั่นใจในการใช้กระบวนการไร้ออกซิเจนมีน้อยกว่ากระบวนการใช้ออกซิเจน

อย่างไรก็ตาม จากข้อได้เปรียบดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีแนวโน้มที่จะนำกระบวนการไร้ออกซิเจนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น ประกอบกับปัจจุบันได้มีการศึกษาลึกลงไปถึงกลไกต่างๆ ทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ หรือใช้แก้ปัญหาได้มากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการค้นคว้าเรื่องกระบวนการไร้ออกซิเจนในระยะ 30 ปีที่ผ่านมา มีความก้าวหน้ามากกว่ากระบวนการใช้ออกซิเจนมาก ดังจะเห็นได้จากมีงานวิจัยหรือเอกสารความรู้ ทฤษฎีใหม่ๆ เกี่ยวกับกระบวนการไร้ออกซิเจนเผยแพร่ออกมามากมาย

2.3.1.1 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการไร้ออกซิเจน

ในกระบวนการไร้ออกซิเจน สารตั้งต้นของปฏิกิริยาคือสารอินทรีย์ และจุดสุดท้ายของกระบวนการ คือการสลายหรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่กว่าจะบรรลุถึงจุดมุ่งหมายดังกล่าวได้ต้องประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนอย่างง่ายในการสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้ออกซิเจน

การเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปเป็นกาซมีเทนและกาซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ต้องผ่านถึง 4 ขั้นตอน เกี่ยวข้องกับแบคทีเรีย 3 ประเภท ทำงานอย่างสอดคล้องกัน ผลิตภัณฑ์จากแบคทีเรียประเภทแรก จะเป็นสารตั้งต้นให้แบคทีเรียประเภทต่อไป ดังนั้นหากมีเหตุการณ์ที่ทำให้เสียสมดุลย์ ไม่ว่าในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง เช่น แบคทีเรียบางชนิดมีจำนวนน้อยลง ไม่สามารถรับผลิตภัณฑ์ไปใช้ได้หมด เกิดการสะสมในระบบอาจทำให้พีเอชต่ำลงจนเป็นอันตราย ในที่สุดระบบโดยรวมจะล้มเหลว คือไม่สามารถบรรลุเป้าหมายที่ต้องการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ กระบวนการไร้ออกซิเจนจึงถูกมองว่าเป็นระบบที่มีเสถียรภาพต่ำ

กระบวนการไร้ออกซิเจนที่เกิดขึ้น 4 ขั้นตอน เรียกแต่ละขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 Hydrolysis

ขั้นที่ 2 Acidogenesis

ขั้นที่ 3 Acetogenesis

ขั้นที่ 4 Methanogenesis

และเกี่ยวข้องกับแบคทีเรีย 3 พวกคือ

1) Acidogene Bacteria

2) Acetogene Bacteria

3) Methanogene Bacteria

1) ไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยแบคทีเรียหลายจำพวก แต่ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียประเภทสร้างกรด (acidogenic) โดยปล่อยสารเอนไซม์ออกมาภายนอกเซล (extracellular enzyme) และเอนไซม์จะไปลดพลังงานกระตุ้น ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เรียกเอนไซม์เหล่านี้ว่า hydrolytic enzymes หรือ hydrolases แต่ไม่ใช่ว่าเอนไซม์ชนิดเดียวจะสามารถใช้ย่อยสารได้ทุกชนิด น้ำย่อยนอกเซลที่เหมาะกับสารอินทรีย์เฉพาะ เช่น แป้งและไกลโคเจน ต้องใช้เอนไซม์ amylase ส่วนไขมันและไลปิด (lipids) ใช้เอนไซม์ lipase และ esterases โปรตีนต้องใช้เอนไซม์ protease ส่วน amino acid และ lysine ต้องใช้ trypsin เป็นต้น และการทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ ดังนั้นการย่อยสลายสารแต่ละชนิด จึงใช้เวลาต่างกัน

2) การสร้างกรด(acidogenesis)

ผลผลิตจากขั้นตอนที่ 1 จะได้เป็น กรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมัน แล้วแต่ชนิดสารอินทรีย์ จะถูกแบคทีเรียกลุ่มเดียวกับในขั้นตอนที่ 1 คือ พวก Acidogenic organisms ดูดซึมเข้าไปภายในเซล เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของเซล โดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) ภายในเซล และเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิออนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น ผลผลิตที่ได้จะเป็นสารอะไรบ้างนั้นขึ้นอยู่กับ

1.ชนิดสารอินทรีย์ และ

2. ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนในขณะนั้น ($\Delta P\text{-}H_2$)

ตัวอย่างเช่น การย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดอะซิติกโดยผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Embden-Meyerhof Pathway เป็นดังนี้

Low $\Delta P\text{-}H_2$:

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COOH$ (butyric acid) $+ 2CO_2 + 2H_2$

High $\Delta P\text{-}H_2$:

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2COOH$ (propionic acid) $+ CH_3COOH + CO_2 + H_2$

$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COOH$ (butyric acid) $+ 2CO_2 + 2H_2$

ส่วนกรดไขมันชนิดยาว (long chain fatty acid) จะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจนภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ และย่อยสลายกลายเป็นกรดโพรพิออนิกและกรดบิวทิริก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง ดังรูปที่ 2.16

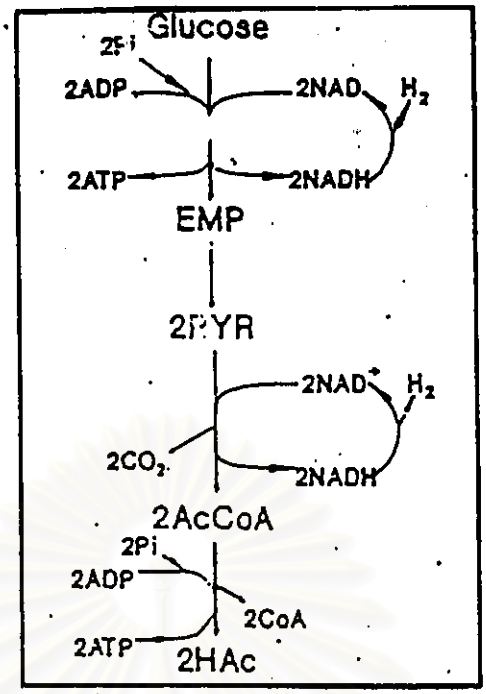
3) <u>การสร้างกรดอะซิติกและกรดไขมันระเหยอื่นๆ (acetogenesis)</u>

กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นในขั้นตอนที่ 2 นั้น จะเป็นอาหารให้กลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนต่อไป แต่เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทิริก กรดโพรพิออนิก เป็นสารอาหารได้ จึงต้องอาศัยแบคทีเรียอะซิโตจีนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตต และสามารถสร้างไฮโดรเจนได้) ทำการย่อยสลายกรดไขมันที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติกเพื่อให้แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ต่อไป ดังสมการข้างล่างดังต่อไปนี้

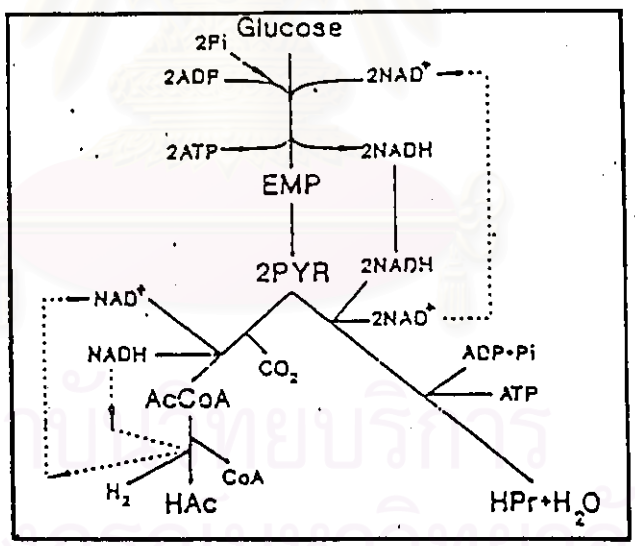
CH_3CH_2COOH (propionic acid) $+ 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$

$CH_3CH_2CH_2COOH$ (butyric acid) $+ 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$

โดยกระบวนการนี้จะเกิดภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง และแบคทีเรียประเภทนี้จะมีส่วนช่วยไม่ให้มีการสะสมตัว ของกรดบิวทิริก กรดโพรไพออนิค ในถังปฏิกิริยา ซึ่งอาจทำให้พีเอชลดลงจนยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้



ก) ที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ กลูโคสจะถูกย่อยสลาย
กลายเป็นกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว



ข) ที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง กลูโคสจะถูกย่อยสลาย
กลายเป็นกรดอะซิติก และกรดโพรไพออนิก

รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาการสร้างกรดไขมันระเหย
ใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำและสูง (PLANS Sam-soon, 1987)

4) <u>การสร้างมีเทน (methanogenesis)</u>

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะใช้กรดอะซิติกและกาซไฮโดรเจนในการสร้างมีเทน ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างมีเทนจำแนกได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

ก) *Obligate acetoclastic methanogen* ซึ่งใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างมีเทนดังสมการ $CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$ ซึ่งจะผลิตมีเทนในระบบถึงร้อยละ 70 ของมีเทนที่ได้ทั้งหมด

ข) *Obligate hydrogenotrophic methanogen (H_2 - Utiliser)* คือแบคทีเรียที่ใช้กาซไฮโดรเจนในการผลิตกาซมีเทน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการ

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

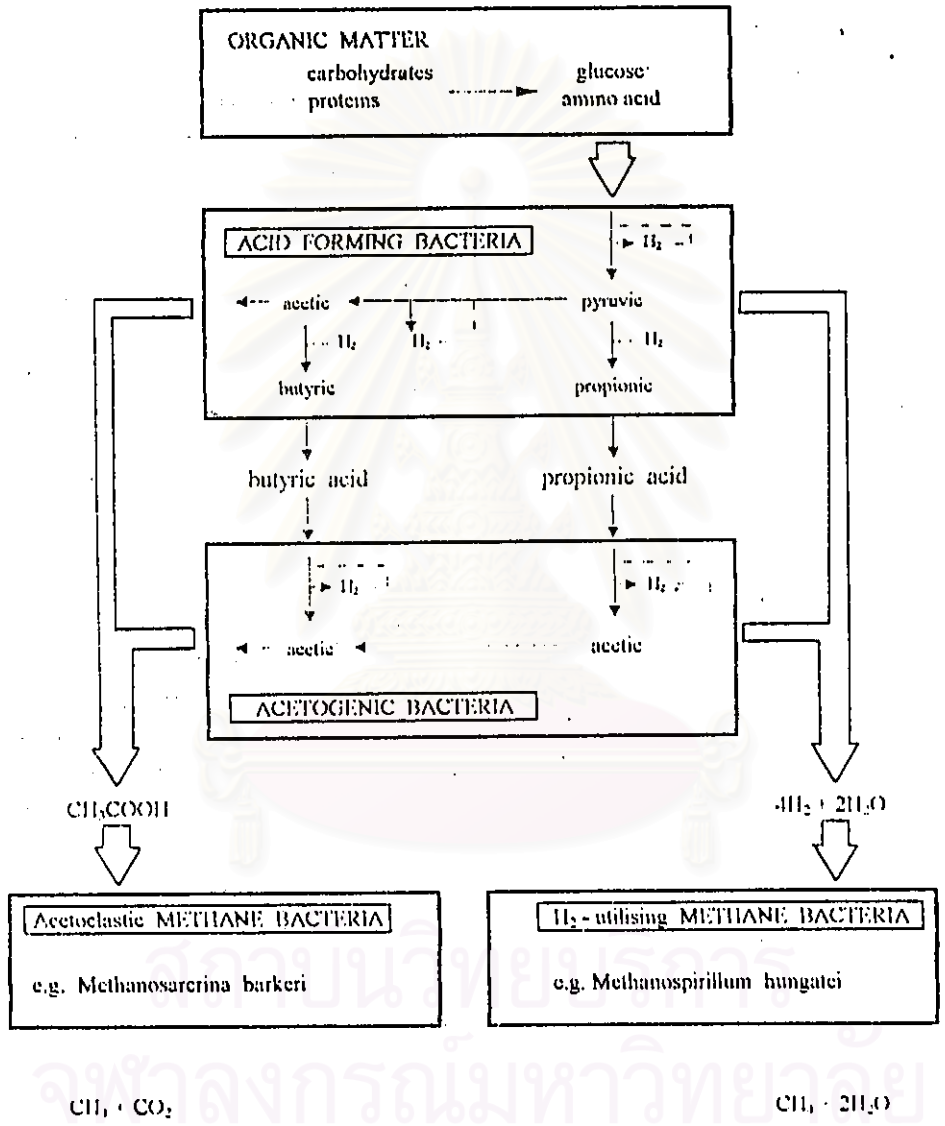
และแบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิคเป็นสารอาหารอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิคสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังสมการ

$$HCOOH \text{ (กรดฟอร์มิค)} \longrightarrow CO_2 + H_2$$

ค) *Hydrogenotrophic/acetoclastic methanogen* คือแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติก หรือกาซไฮโดรเจน แต่ชอบกาซไฮโดรเจนมากกว่า

ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจนทั้ง 4 ขั้นดังแสดงในรูปที่ 2.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจน (Mosey, 1982)

2.3.1.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับระบบไร้ออกซิเจน

แบคทีเรียในระบบไร้ออกซิเจนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ
1.กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน คือพวกแบคทีเรียที่ผลิตกรดในขั้นตอนการสร้างกรด
2.กลุ่มที่สร้างมีเทน

ในขั้นตอนการสร้างกรดของกระบวนการไร้ออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียทั้งพวก obligate anaerobes และ facultative โดยส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นด้วยแบคทีเรียพวกแรกมากกว่า เพราะมีจำนวนมากกว่า แบคทีเรียในหลายๆ สปีชีส์ (species) ของ Pseudomonas Flavobacterium Alcaligenes Escherichia และ Aerobacter เป็นพวกที่สร้างกรด เมตาบอลิซึมของแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนมีหลายแบบ ผลปฏิกิริยาที่ได้จึงมีหลายแบบต่างๆ ไป ถ้าได้สารที่เป็นโมเลกุลอย่างง่าย แบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็สามารถใช้เป็นสารอาหารได้ แต่ถ้าเป็นสารอื่นก็ต้องถูกเปลี่ยนให้เป็นสารโมเลกุลอย่างง่ายก่อน แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจึงจะสามารถนำไปใช้ได้ แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนประเภทที่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่มีบทบาทสำคัญเพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดกับแบคทีเรียที่สร้างมีเทน แบคทีเรียประเภทสร้างไฮโดรเจนนี้เมื่อทำปฏิกิริยาสร้างไฮโดรเจนจะสามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากสารอินทรีย์อื่นเช่นกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 ตัว ที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียที่สร้างกรดแบบธรรมดา และแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมทำให้พีเอชในระบบลดลงได้จนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นหากมีการสะสมตัวอยู่ภายในระบบจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมันขึ้นมา อย่างไรก็ตามแบคทีเรียที่สร้างมีเทนสามารถใช้ไฮโดรเจนในการสร้างมีเทนได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดและที่สร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน คือแบคทีเรียที่สร้างกรดสร้างอาหารให้แก่แบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยทำลายกาซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่สร้างกรด

ในขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียที่ผลิตกาซมีเทนจะเป็นแบคทีเรียในกลุ่มเล็กๆ ของพวก obligate anaerobes ซึ่งไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย แบคทีเรียพวกนี้เจริญเติบโตช้า เลือกชนิดของอาหารมากโดยใช้ได้เฉพาะกาซไฮโดรเจน กาซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิค กรดอะซิติก และเมทฮานอล ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหารในการสร้างมีเทนมากที่สุด ตัวอย่างแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและสารอาหารที่ใช้แสดงในตารางที่ 2.2 เมื่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนต้องการสารอาหารบางชนิดอย่างเจาะจง แต่แบคทีเรียที่สร้างกรดสามารถสร้างกรดอินทรีย์ได้หลายชนิดทำให้แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมีส่วนสำคัญดังกล่าว

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแบคทีเรียที่สร้างมีเทนและสารอาหารที่ใช้ เสนอโดย Balch, 1979 (อ้างอิงใน Mosey, 1982)

Order/ Family	Genus	Species	Substrates for growth and methane production
I/1	*Methanobacterium*	formicicium	$H_2 + CO_2$ formate
I/1	*Methanobacterium*	bryantii	$H_2 + CO_2$
I/1	*Methanobacterium*	bryantii, strain M.o.H.G.	$H_2 + CO_2$
I/1	*Methanobacterium*	thermoautotrophicum	$H_2 + CO_2$
I/1	*Methanobrevibacter*	ruminantium	$H_2 + CO_2$ formate
I/1	*Methanobrevibacter*	arboriphilus	$H_2 + CO_2$
I/1	*Methanobrevibacter*	arboriphilus strain AZ	$H_2 + CO_2$
I/1	*Methanobrevibacter*	arboriphilus strain DC	$H_2 + CO_2$
I/1	*Methanobrevibacter*	smithii	$H_2 + CO_2$ formate
II/1	*Methanococcus*	vannielii	$H_2 + CO_2$ formate
II/1	*Methanococcus*	voltae	$H_2 + CO_2$ formate
III/1	*Methanomicrobium*	mobile	$H_2 + CO_2$ formate
III/1	*Methanogenium*	cariaci	$H_2 + CO_2$ formate
III/1	*Methanogenium*	marisnigri	$H_2 + CO_2$ formate
III/1	*Methanospirillum*	hungatii	$H_2 + CO_2$ formate
III/2	*Methanosarcina*	barkeri	$H_2 + CO_2$ methanol acetate
III/2	*Methanosarcina*	barkeri strain 227	$H_2 + CO_2$ methanol acetate
III/2	*Methanosarcina*	barkeri strain W	$H_2 + CO_2$ methanol acetate

แบคทีเรียที่สร้างมีเทน อาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรก เรียกว่า hydrogenotrophic methanogen หรือ hydrogen utilizer สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน กล่าวคือ ได้คาร์บอนมาจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานมาจากไฮโดรเจน แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิคเป็นสารอาหารเพียงอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิคสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ส่วนชนิดที่ 2 คือพวกที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก โดยมีเทนส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของกรดอะซิติก แบคทีเรียชนิดนี้เรียกว่า acetoclastic methanogen

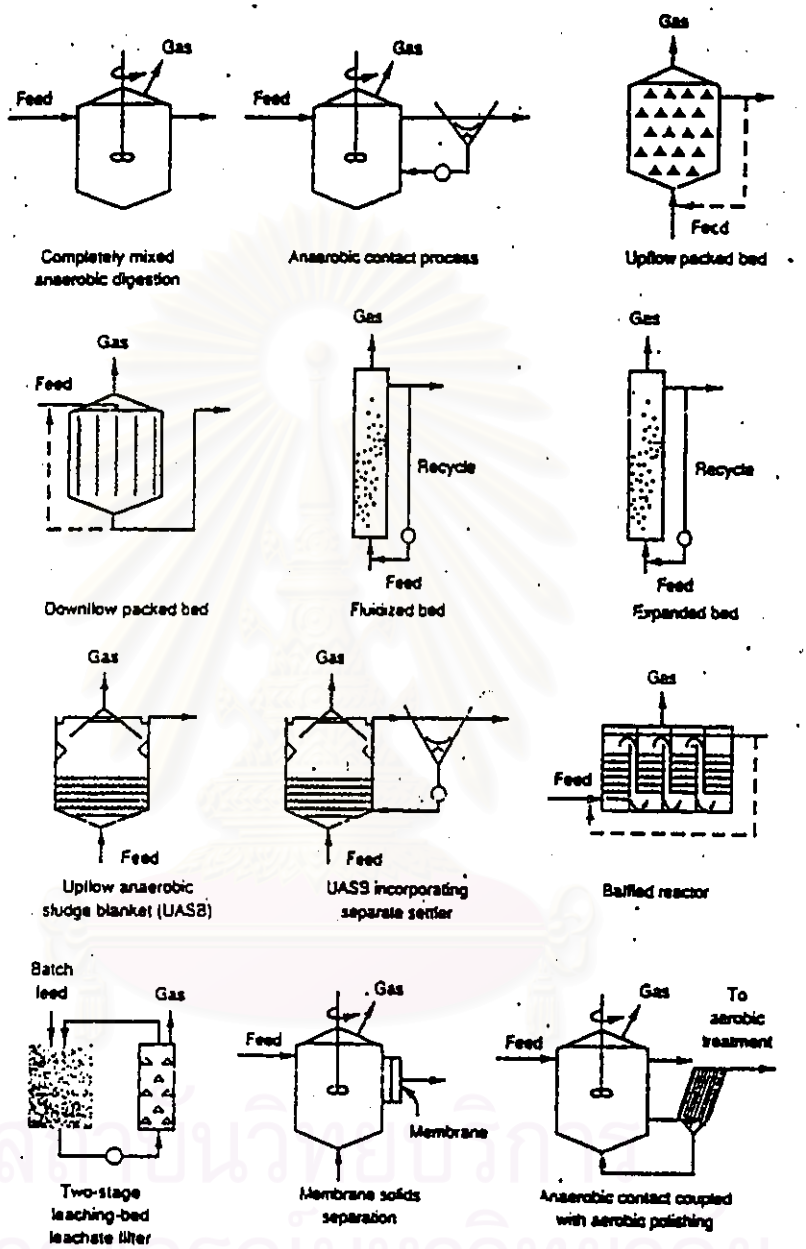
2.3.2 ระบบยูเอเอสบี (UASB; Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

2.3.2.1 ความเป็นมาของระบบ ยูเอเอสบี

หลักการของระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่คือ *การเพิ่มขนาดของมลสารให้ใหญ่จนสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้* แล้วแต่ว่าจะใช้กรรมวิธีใด เช่นการกำจัดโลหะหนักใช้การสร้างตะกอนแข็งด้วยสารเคมี แล้วตกตะกอน แยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ หรือระบบกำจัดสารอินทรีย์ด้วยชีวภาพ โดยการให้แบคทีเรียกินสารอินทรีย์แล้วไปสร้างเป็นเซลล์(อาจมีผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้นใหม่ในรูปของกาซที่หนีออกจากน้ำได้ง่าย) จากนั้นจึงหาทางตกตะกอนแยกเอาเซลล์ออกจากน้ำเสียเหมือนกัน ดังนั้นในกรณีที่มลสารละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ระบบบำบัดที่ดีจะต้องสามารถดึงหรือแยกมลสารนั้นให้ออกมาอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำก่อน เช่นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ตะกอนเซลล์ แล้วจึงหาทางแยกผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย ซึ่งโดยมากมักใช้ถังตกตะกอน เนื่องจากการใช้ถังตกตะกอนเป็นการแยกมลสารที่เสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดและวิศวกรสามารถออกแบบถังตกตะกอนให้ทำงานได้ดีที่สภาวะต่างๆ โดยใช้การคำนวณทางทฤษฎีที่ถูกต้องได้ ในกรณีของระบบชีวภาพ เห็นได้ว่าการที่ระบบใดจะทำงานได้ดี น้ำทิ้งมีปริมาณสารปนเปื้อนต่ำต้องประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. เปลี่ยนมลสารละลาย มาอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำหรือเป็นเซลล์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำได้โดย
   - -หาทางเลี้ยงเชื้อไว้ในระบบจำนวนมากๆ มีระบบกักเก็บเชื้อที่ต้องการไม่ให้หลุดไปกับน้ำทิ้ง
   - -เลือกชนิดของเชื้อให้สามารถกินมลสารนั้นได้ดี
   - -หาทางกระจายน้ำเสียให้สัมผัสกับเชื้ออย่างทั่วถึง
2. แยกเซลล์ ออกจากน้ำเสียได้ง่าย เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ทำได้โดย
   - -สร้างเซลล์ที่สามารถรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนหนักๆ หรือเป็นแผ่นฟิล์ม
   - -ออกแบบอุปกรณ์แยกเชื้อออกจากน้ำทิ้งให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการใช้ออกซิเจนที่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวข้างต้นคือกระบวนการแอคติเวเต็ดสลัดจ์ แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงเนื่องจากต้องมีการเติมอากาศ และเกิดสลัดจ์ปริมาณมาก จึงมีการพัฒนากระบวนการไร้ออกซิเจนแบบต่างๆ ขึ้นมาแทน (รูปที่ 2.18) โดยหาทางออกแบบระบบให้สอดคล้องกับความต้องการดังกล่าว ระบบที่สามารถทำได้เช่นนั้นคือ ระบบยูเอเอสบี



รูปที่ 2.18 ลักษณะระบบต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

(Metcalf & Eddy, 1991)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากความสำเร็จในการแยกเชื้อแบคทีเรีย พวก Methanogenesis ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์ได้สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนมากขึ้น จึงมีการพัฒนาระบบไร้ออกซิเจนมาใช้ เรียกว่าระบบ ยูเอเอสบี ซึ่งมีลักษณะดังนี้

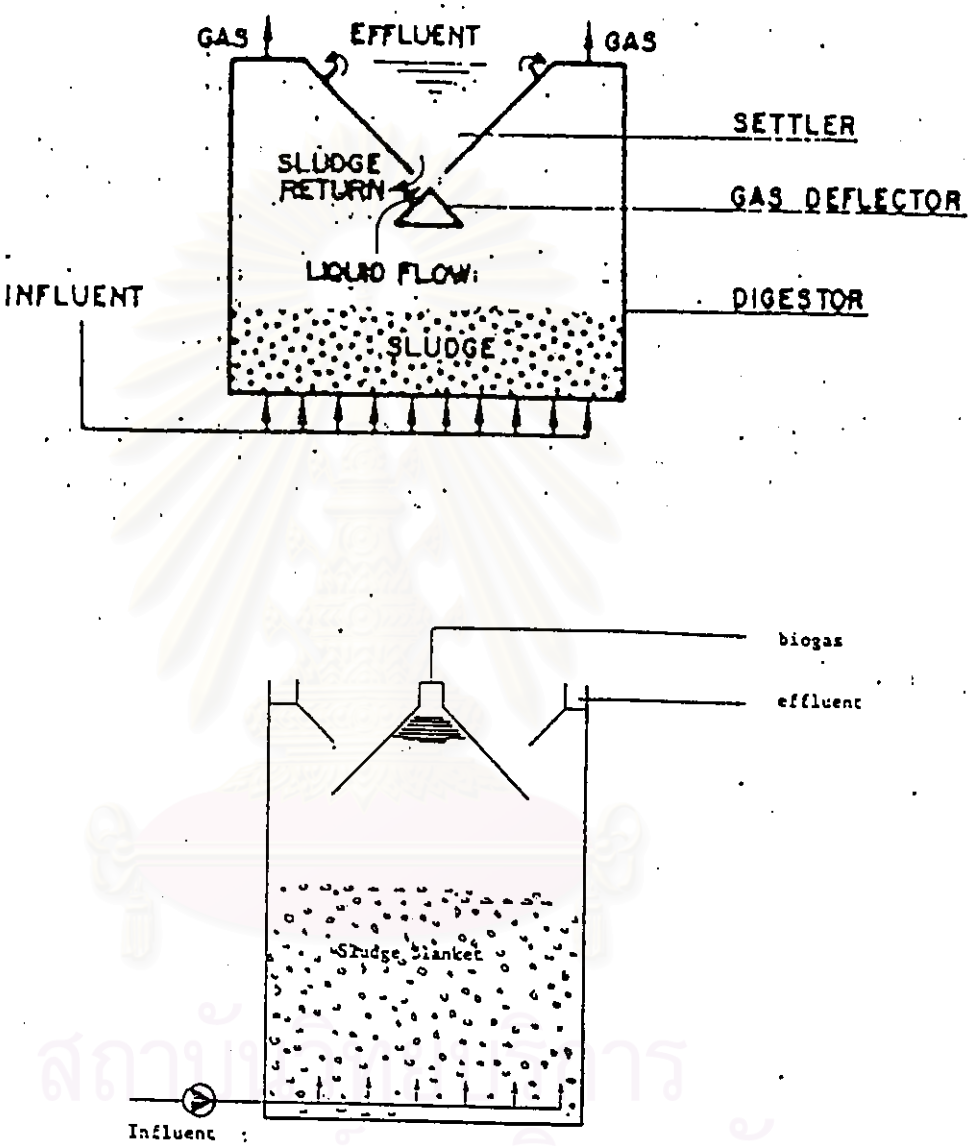
1.ส่วนที่เป็นถังหมักหรือถังปฏิกิริยา มีการป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างผ่านระบบกระจายน้ำให้น้ำเสียเข้าอย่างทั่วถึง การไหลของน้ำเสียในถังปฏิกิริยา ไหลจากด้านล่างขึ้นบน

2.มีการเลี้ยงเชื้อ แบบไร้ออกซิเจนหรือแบบแอนแอโรบิค ให้เกิดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นรวมเป็นเม็ดหรือเกล็ด

3.เชื้อที่มีความหนาแน่นสูงจะจมตัวอยู่ด้านล่าง โดยมีการเรียงตัว จากขนาดใหญ่ขึ้นไปหาขนาดเล็กเหมือนชั้นทรายกรอง เป็นชั้นสลัดจ์ (sludge bed) ส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำและมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่า จะถูกฟองกาซที่ผุดขึ้นมาและการไหลของน้ำที่เข้ามาจากทางด้านล่างถัง กวนให้ขึ้นมาเป็นชั้นของตะกอนแขวนลอย (sludge blanket)

4.มีการออกแบบให้สามารถควบคุมให้มีเซลล์หลุดออกไปกับน้ำทิ้งที่ออกจากถังน้อยลง และสามารถเก็บกาซมีเทนไปใช้ได้ จึงมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกกาซ น้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ ที่เรียกว่า GSS (gas-solid seperator device) ไว้ด้านบนของถัง ซึ่งอุปกรณ์ GSS นี้มีการออกแบบได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างถัง (รูปที่ 2.19) แต่ใช้หลักการเดียวกันคือ

- ☐ เก็บกาซไว้โดยการแทนที่น้ำ
- ☐ แยกน้ำกับกาซ ไม่ให้ไหลออกทางเดียวกัน โดยอาศัยหลักการที่ว่า น้ำสามารถไหลเลี้ยวไปมาได้ แต่กาซมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นเส้นตรงเท่านั้น ถ้ามีสิ่งกีดขวาง หรือแผ่นปะทะใดมาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้นหลังจากพ้นสิ่งกีดขวางนั้นแล้ว ก็จะลอยตัวขึ้นเป็นเส้นตรงดังเดิม
- ☐ แยกตะกอนออกจากน้ำโดยการตกตะกอน ดังนั้นในส่วนของ GSS จึงต้องมีส่วนที่น้ำนิ่งและช่องเปิดใหญ่พอที่ตะกอนจะตกกลับลงมายังถังปฏิกิริยาได้



รูปที่ 2.19 ลักษณะชุดแยกกาซ น้ำ ตะกอนจุลินทรีย์ (Souza,1986)

จุดเด่นของระบบยูเอเอสบี คือมีความสามารถในการเก็บเซลล์ไว้ในระบบได้ดี ซึ่งต้องประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. การเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เป็นเกล็ด หรือเม็ด ที่มีความหนาแน่นสูง ตกตะกอนได้ดี
2. การออกแบบอุปกรณ์ GSS ให้สามารถทำงานได้ดี ตะกอนจุลินทรีย์ที่ตกตะกอนแยกตัวลงมาแล้ว ต้องสามารถตกกลับเข้าถังปฏิกิริยาได้ง่าย ไม่มีการสะสมตัวอยู่ในส่วนตกตะกอน และมีตะกอนหลุดออกไปกับน้ำทิ้งน้อยที่สุด

สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบยูเอเอสบี ให้ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ คือการออกแบบระบบกระจายน้ำเข้าที่ก้นถัง ให้สามารถกระจายน้ำเข้าได้อย่างสม่ำเสมอเต็มพื้นที่หน้าตัดถัง น้ำเสียสัมผัสกับแบคทีเรียอย่างทั่วถึง หลีกเลี่ยงการป้อนน้ำเข้าถังเพียงจุดเดียวโดยไม่มีการกระจายน้ำ เพราะจะมีการไหลลัดวงจรหรือเกิดเป็นช่อง และอุปกรณ์กระจายน้ำนี้ต้องออกแบบให้มีโอกาสอุดตันได้น้อยด้วย

<u>ข้อดีของระบบยูเอเอสบี</u>

- เก็บเชื้อไว้ในระบบได้มาก สามารถรับภาระสารอินทรีย์ (organic load) และ shock load ได้สูง
- ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง (media)
- สามารถนำกาซมีเทนไปใช้ได้
- มีสลัดจ์เกิดขึ้นน้อย
- ต้องการอาหารเสริม (nutrient) ต่ำ
- ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ ไม่ต้องการการเติมอากาศ และการกวนผสม
- ระบบกระทัดรัด สามารถออกแบบให้อุปกรณ์ GSS รวมอยู่ในโครงสร้างเดียวกับถังปฏิกิริยาได้

<u>ข้อเสียของระบบยูเอเอสบี</u>

☐ ต้องการอัตราการผลิตกาซชีวภาพที่เหมาะสม เพื่อช่วยในการกวน

☐ ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเม็ด ตกตะกอนได้ดี

☐ ในเมืองไทยยังมีการใช้ระบบนี้น้อย หา Seed ยาก

2.3.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีเป็นกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบหนึ่ง การทำงานของระบบขึ้นกับการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ปัจจัยที่มีผลต่อจุลินทรีย์แบ่งได้เป็น

1) *อุณหภูมิ (Temperature)*

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการไร้ออกซิเจนมี 2 ช่วงคือ

- Mesophilic ช่วงอุณภูมิ 30 - 40° C
- Thermophilic ช่วงอุณภูมิ 45 -55° C

2) *พีเอช (pH)*

ค่าพีเอชที่เหมาะกับกระบวนการไร้ออกซิเจนควรอยู่ระหว่าง 6.8-7.2 (มั่นสิน,2536) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสามารถปรับตัวได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าดังนั้นการควบคุมพีเอชของระบบจึงมุ่งเน้นไปที่ค่าที่เหมาะสมกับกลุ่มสร้างมีเทนมากกว่า

3) *กรดไขมันระเหย (volatile fatty acid, VFA) สภาพด่าง (alkalinity)*

กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียที่สร้างกรด ปกติควรมีค่าประมาณ 200-400 มก./ล.ของกรดอะซิติก กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุลย์ เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียและตัวกรดเองที่ความเข้มข้นสูงๆ เป็นพิษต่อแบคทีเรีย ดังนั้นสภาพด่างจึงแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบ ซึ่งจะรักษาระบบให้มีพีเอชค่อนข้างคงที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ กระบวนการไร้ออกซิเจน เช่นถังย่อยสลัดจ์ (sludge digestion) มีสภาพด่างประมาณ 1500-2000 มก./ล.

นอกจากจะดูจากสภาพความเป็นด่างแล้ว ต้องพิจารณาอัตราส่วนของ กรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างด้วย (VFA/Alk)

ถ้า VFA/Alk < 0.4 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์สูง ระบบทำงานได้ดี

ถ้า VFA/Alk > 0.8 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ อาจจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลงหรือล้มเหลวได้

สารเคมีที่ใช้เพิ่มความเป็นด่างให้แก่ระบบมีอยู่หลายชนิดเช่นสารไบคาร์บอเนตหรือคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เป็นสารเคมีที่ดีที่สุดในการใช้ควบคุมพีเอช เพราะละลายน้ำได้ดีและให้คาร์บอเนตโดยตรงต่อระบบ แต่ข้อเสียคือมีราคาแพงกว่าสารเคมีตัวอื่นๆ

4) *อาหารเสริม (nutrient)*

ถึงแม้ว่าเซลแบคทีเรียที่สร้างขึ้นมาในกระบวนการไร้ออกซิเจนจะมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน แต่จากอัตราส่วน C:N:P:S ในเซลมีค่าประมาณ 100:10:1:1 จึงจำเป็นต้องรักษาสัดส่วนนี้ไว้ไม่ให้น้อยกว่านี้ จุลินทรีย์จึงต้องการอาหารเสริมนอกจากคาร์บอนแล้ว เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยค่า BOD:N:P ควรมีอัตราส่วนอย่างน้อย 100 : 1.1 : 0.2 สำหรับกระบวนการไร้ออกซิเจน (McCarty, 1964 อ้างถึงใน โสภา, 2540) นอกจากนี้ยังมีธาตุบางอย่างที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการเป็นปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ ได้แก่ เหล็ก โคบอลท์ นิเกิล ซัลเฟอร์

5) *สารพิษ (toxic)*

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไร้ออกซิเจน โดยเฉพาะแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทนมีหลายชนิด ความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษไม่ได้หมายถึงสารอันตรายโดยตรงเท่านั้น สารบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นสารพิษได้ รวมถึงอิออนบวกและโลหะหนักต่างๆ ควรมีการตรวจวัดปริมาณสารพิษในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบเพื่อหาทางแก้ไข หรือลดความเป็นพิษลง เช่นการตกตะกอนแยกโลหะหนักออกก่อน เป็นต้น เชื้อแบบไร้ออกซิเจนมีความทนทานต่อสารพิษมากกว่าเชื้อแบบอื่น แต่หากระบบล้มเหลวลงเนื่องจากสารพิษต้องใช้เวลาในการฟื้นตัวนานเช่นเดียวกัน

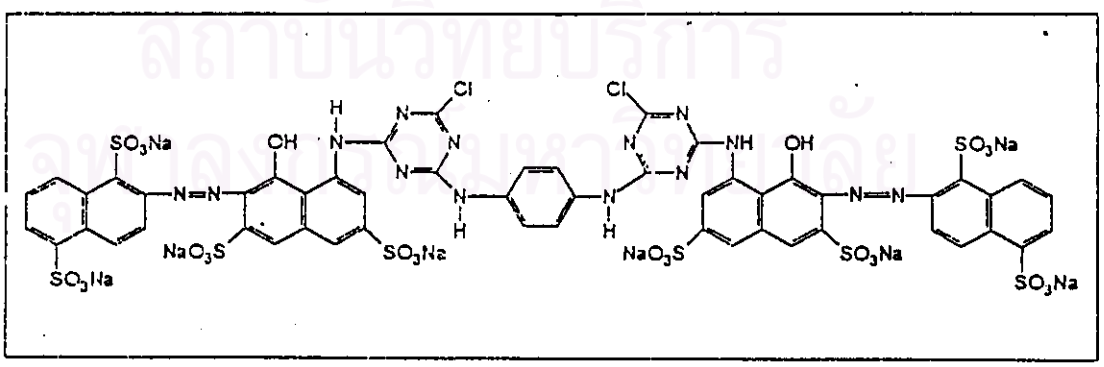
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การกำจัดสีย้อมด้วยระบบไร้ออกซิเจน

สีย้อม เป็นสารเคมีที่มีการใช้แพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ บริษัทผู้ผลิตสีย้อมผลิตสีย้อมชนิดต่างๆ มากกว่า 40,000 ชนิด ด้วยกำลังการผลิต 128 ตันต่อวัน และคาดว่าประมาณร้อยละ 15 ของสีย้อมที่ผลิตได้ ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปน้ำเสีย (FizGeral,1995) โรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่ใช้สีย้อมประเภทสีเอโซรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นสีที่ย้อมติดผ้าฝ้ายได้ดี มีความคงตัวและความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้ยากแก่การบำบัด

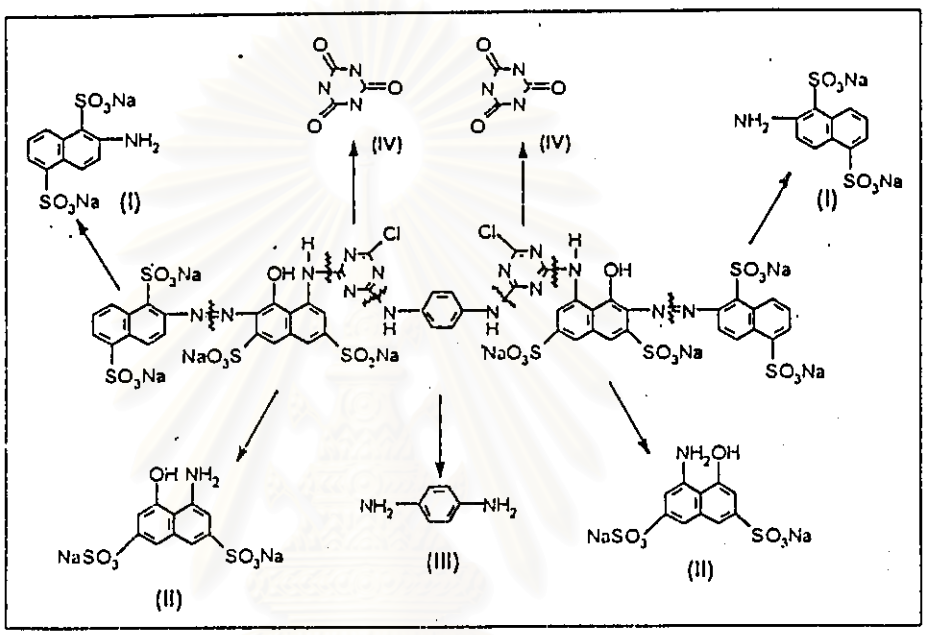
ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการบำบัดแบบต่างๆ พบว่ามีการกำจัดสีย้อมเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Brown and Laboureur,1983 อ้างถึงโดย Munruk,1997 : Carliell et al., 1995) ซึ่งกลไกการกำจัดสีย้อมดังกล่าวยังไม่ทราบแน่ชัด และได้มีผู้เสนอแนวความคิดว่า การกำจัดสีย้อมเกิดจากการที่สีย้อมใช้พันธะเอโซ (พันธะคู่ของไนโตรเจน: -N=N-) เป็นตัวรับอิเลกตรอนทำให้พันธะแตกออก หลังจากนั้นโปรตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับกลุ่มไนโตรที่ไม่อิ่มตัว(unsaturate nitro group) เกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกอามีน 2 ชนิด (FizGeral,1995)

Carliell และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษากลไกการสลายตัวของสีย้อม โดยการตรวจวัดโครงสร้างของสีย้อมก่อนการบำบัดและโครงสร้างสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่หลังการสลายตัวของสี โดยใช้สี C.I. Reactive red 141 ที่มีโครงสร้างสีก่อนการสลายตัว ดังรูปที่ 2.20



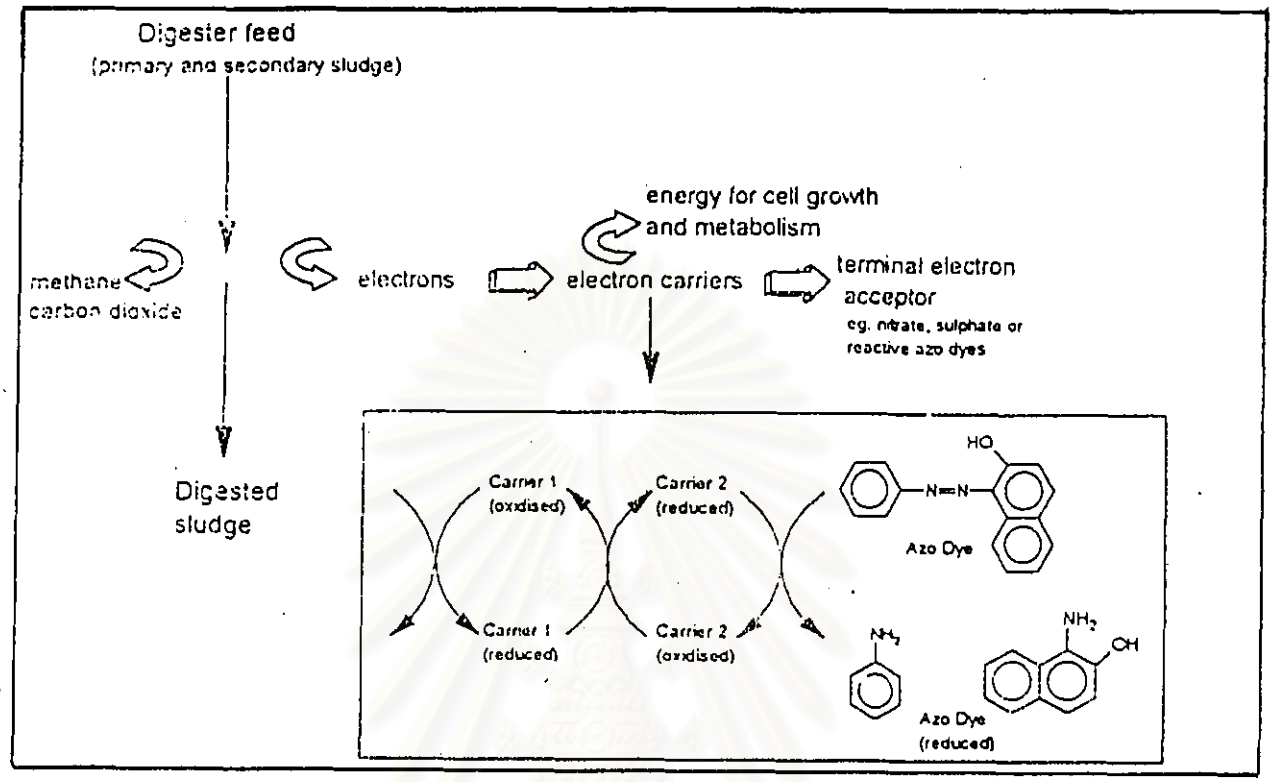
รูปที่ 2.20 โครงสร้างสี C.I. Reactive Red 141 (Carliell ,1994)

หลังจากป้อนน้ำเสียที่มีสี C.I. Reactive red 141 เข้ากระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ผลการวิเคราะห์น้ำผ่านการบำบัด ซึ่งมีสีลดลง พบว่ามีเกิดสารประกอบ 4 ประเภท ได้แก่ (1.) 2-Aminonapthalene-1,5-disulphonic acid (2.) 1,7-diamino-8-naphtho-3,6-disulphonic acid (3.) *p*-diamino-benzene และ (4) cyanuric acid และคาดว่าเป็นสารที่เกิดจากการสลายตัวของสี C.I. Reactive red 141 ดังรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่ามีการแตกพันธะเอโซของสีย้อมเกิดขึ้น



รูปที่ 2.21 แนวคิดการสลายโครงสร้างสี C.I. Reactive Red 141 (Carliell ,1994)

Carliell ได้อธิบายไว้ในปี 1996 ถึงกลไกการกำจัดสีประเภทนี้ว่า เมื่อจุลชีพมีการใช้คาร์บอนจากแหล่งคาร์บอนในระบบเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ระหว่างกระบวนการมีการปล่อยอิเลกตรอนออกมา อิเลกตรอนนี้จะมีการถ่ายเทไปยังสารต่างๆ โดยผ่านตัวกลาง ซึ่งอาจเป็นโคเอนไซม์บางชนิดเช่น NAD (nicotinamine adenine-dinucleotide) หรือ FAD (flavin-adenine-dinucleotide) ไปยังสารรับอิเลกตรอนตัวสุดท้ายเช่นไนเตรต ซัลเฟต หรือสีเอโซรีแอกทีฟ ดังรูปที่ 2.22 ในกรณีที่สีเอโซรีแอกทีฟเป็นตัวสุดท้ายที่รับอิเลกตรอน อิเลกตรอนจะสลายพันธะเอโซ ทำให้สีหายไป ซึ่งผลการวิจัยเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับ FizGerald (1995) และ Bishop (1994) ซึ่งได้ตรวจวัดโครงสร้างสารประกอบหลังการสลายตัวของสีย้อมและตรวจพบสารประกอบที่คาดว่าเกิดจากการแตกพันธะเอโซของสีย้อมเช่นกัน



รูปที่ 2.22 กลไกการสลายพันธะเอโซด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน (Carliell,1996)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบความสามารถในการกำจัดสีเอโซของจุลชีพและเสนอแนวความคิดว่าการสลายตัวของสีย้อมเกิดจากการแตกพันธะเอโซของสีย้อมที่เป็นตัวรับอิเลกตรอน (Rahman,1991 : Rakmi etal.,1990 :Ganesh ,1994) ถึงแม้ว่ากลไกการกำจัดสีย้อมดังกล่าวยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่เข้าใจกันว่าเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ที่เรียกว่า azoreductase ซึ่งตรวจพบในกลุ่มจุลชีพที่สามารถกำจัดสีเอโซได้ Chung และคณะ (1992) ระบุว่าเอนไซม์ azoreductase นี้ไม่สามารถทนต่อออกซิเจนได้ และต้องการสารประกอบฟลาวิน (flavin) เช่น โคเอนไซม์ FAD เพื่อช่วยในการทำงาน โดยสาร FAD จะถูกรีดิวซ์ด้วยสาร NADH กลายเป็น $FADH_2$ จากนั้น $FADH_2$ ถ่ายอิเลกตรอนให้กับพันธะเอโซของสีย้อม แล้วแตกพันธะเอโซออก

2.5 การศึกษาที่ผ่านมา

Christenson และคณะ (1984) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงด้วยระบบยูเอเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปมันฝรั่ง ชื่อ Ore-Ida Food inc., โดยใช้ถังยูเอเอสบี สำเร็จรูปยี่ห้อ Biothane ™ ซึ่งมีค่าการออกแบบ และผลที่ได้จากการเดินระบบเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลย์ ดังนี้

	ค่าออกแบบ	เมื่อเข้าสู่สมดุลย์
ปริมาตรถังปฏิกิริยา ($ม.^3$)	2200	2200
อัตราการไหลเฉลี่ย ($ม.^3$/วัน)	3000	2590
เวลากักน้ำ (ชม.)	17.6	21.2
ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล.)	4300	2500
การกำจัด ซีโอดีร้อยละ	80	85
สารแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)	500	730
การกำจัดสารแขวนลอยทั้งหมด (ร้อยละ)	40	14
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	32	35
อัตราภาระบรรทุก ซีโอดี ($กก./ม.^3$-วัน)	6	3

นอกจากนี้ยังได้ข้อมูลอื่นๆ ว่า

- ถังประเภทนี้มีการทำงานในช่วง mesophilic ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเดินระบบประมาณ 32 °C
- ถ้าถังมีเวลากักน้อย (น้อยกว่า 24 ชม.) ระบบแบบนี้ไม่สามารถกำจัดสารแขวนลอยออกได้มากนัก จำเป็นต้องมีอุปกรณ์กำจัดสารแขวนลอยเบื้องต้นให้กับน้ำเสียก่อนเข้าระบบ โดยปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดที่เข้าระบบไม่ควรเกินกว่า 500 มก./ล.
- ในช่วงการเริ่มเดินระบบ ต้องมีการเติมโซดาไฟช่วยในการรักษาระดับ พีเอช ≅ 7

จากการทดลองเดินระบบเป็นเวลา 7 เดือน (ใช้เวลาเริ่มเดินระบบ นาน 6 อาทิตย์) ทางคณะผู้ทดลองสรุปว่า สามารถใช้ระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียที่มีซีโอดีสูงได้เป็นอย่างดี ได้กาซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ ถ้ามีการควบคุมที่เหมาะสมสามารถเดินระบบให้อยู่ในช่วงของค่าการออกแบบได้ และเสนอแนะว่าควรเลือกใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่มีคุณภาพสูง มีข้อขัดข้องน้อย เพราะระบบต้องเดินอย่างต่อเนื่อง การหยุดระบบเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ จะทำให้ต้องเสียเวลาเริ่มเดินระบบใหม่

Brown และ Hamberker (1987) ทดลองใช้กระบวนการไร้ออกซิเจนบำบัดน้ำเสียสีย้อม และมีการวิเคราะห์สารประกอบอามีนที่เกิดขึ้นหลังการสลายตัวของสีเอโซภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ผลการทดลองพบว่าน้ำผ่านการบำบัดมีสีลดลง สนับสนุนแนวความคิดที่ว่า สามารถใช้กระบวนการไร้ออกซิเจนในการกำจัดสีเอโซได้ น้ำผ่านการบำบัดมีสารประกอบอามีนซึ่งคาดว่ามาจากโครงสร้างพื้นฐานของสีนั้นเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณสารประกอบอามีนที่วัดได้น้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้ทางทฤษฎีมาก ทางคณะผู้วิจัยให้เหตุผลว่าอาจเนื่องมาจาก

1. สีย้อมที่ใช้มีการปนเปื้อนมลทินสารอย่างอื่น ทำให้ตรวจวัดปริมาณสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่หลังการสลายตัวของสีย้อมได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น
2. อาจมีสารอามีนบางส่วนติดออกไปกับสลัดจ์ได้
3. แนวความคิดที่ว่า การสลายสีย้อมเอโซด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนทำได้โดยการแตกพันธะเอโซ อาจไม่ใช่แนวความคิดที่ถูกต้อง แต่ในขณะนั้น ยังไม่มีข้อสรุปใดที่สามารถอธิบายกลไกการสลายตัวของสีเอโซได้ดีไปกว่าแนวความคิดนี้

Vogksner (1993) ศึกษาลักษณะการสลายตัวของสีย้อมเอโซริแอกทีฟ 16 ชนิด โดยใช้โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ และดีบุก (II) คลอไรด์ มีการวิเคราะห์สารที่เกิดขึ้นหลังการสลายตัวของสีด้วยเครื่อง high-performance liquid chromtogsaphy/mass spectrometry (HPLC/MS) ผลการทดลองพบว่า กระบวนการกำจัดสีย้อมโดยรีดิวซ์ด้วยสารเคมีทำให้มีการสลายพันธะเอโซแล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกอามีน ซึ่งเป็นอันตรายเพิ่มขึ้นมากกว่าสีย้อมที่ไม่ผ่านการบำบัด

Carliell และคณะ (1994) ดำเนินการทดสอบความเป็นไปได้ในการสลายสีย้อม C.I. Reactive Red 141 ด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนในห้องทดลอง พบว่าสีสลายตัวไป จึงเสนอแนวความคิดว่าการที่สีเอโซมีการสลายตัวไป เนื่องจากการทำลายพันธะเอโซในสารประกอบสี แต่การตรวจวิเคราะห์ทางเคมีทำได้เพียงตรวจพบว่ามีสารประกอบบางชนิดเกิดขึ้นใหม่หลังจากที่สีหายไป และสารประกอบที่เกิดขึ้นมาใหม่นั้น น่าจะเป็นผลมาจากการแตกตัวของพันธะเอโซ แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ลึกลงไปถึงว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นมาใหม่นั้นเกิดจากการสลายตัวจริงหรือไม่

นอกจากนี้ยังทำการทดลองกับระบบบำบัดน้ำเสียจริง โดยการฉีดสี C.I.Reactive Red 141 เติมลงในระบบแอคติเวเตดสลัดจ์ แบบ 5 stage Bardenpho พบว่าการสลายตัวของสีเกิดขึ้นหลังการกำจัดไนเตรต แสดงว่ากลไกการกำจัดสีที่เกิดขึ้น ไม่ได้เกิดจากตัวแบคทีเรียไปทำปฏิกิริยากับสีโดยตรง แต่เป็นผลมาจากสภาวะที่มีการให้อิเลกตรอน ที่แบคทีเรียเป็นตัวสร้างสภาวะนั้นขึ้นมา

Seshadri และ Bishop (1994) ทำการศึกษาการสลายตัวของสีเอโซ 4 ชนิด ได้แก่สี Acid - Orange7, Acid - Orange 8, Acid - Orang 10 และ Acid - Red 14 โดยใช้ระบบแอนแอโรบิกแบบฟลูอิดไดซ์เบด (anaeroobic fluridized bed) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิช่วง 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส เป็นระบบบำบัดขั้นแรก ตามด้วยระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ที่ควบคุมอุณหภูมิการทำงาน 25 ± 1 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการกำจัดสีส่วนใหญ่เกิดได้ดีในระบบแอนแอโรบิกที่มีเวลากักน้ำ 12 - 24 ชั่วโมง

Carliell และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษากลไกการสลายสี เอโซ ต่อเนื่องจากปี 1994 Carliell ได้อ้างถึงแนวความคิดของ Gingell และ Walker (1971) ในการสลายสีเอโซ Red 2G ว่าเกิดจากการที่ flavin ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการขนส่งอิเลกตรอน ในขั้นตอนการเปลี่ยนรูป flavoprotine ส่งไปยังสีเอโซ ซึ่งสีเอโซจะเป็นตัวรับอิเลกตรอนเพื่อรีดิวซ์ flavin แล้วแตกพันธะเอโซของตนเอง คณะผู้วิจัยจึงทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นสี C.I.Reactive Red 141 ที่เข้าระบบในช่วง 100 150 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าอัตราการสลายตัวของสีเอโซเป็นความสัมพันธ์ลำดับที่ 1 กับความเข้มข้นสีเริ่มต้น และยังพบจุดที่น่าสนใจอีกว่า

- การเติมแหล่งคาร์บอนอื่น เช่น กลูโคส ให้กับระบบช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดสีอย่างเห็นได้ชัด
- ไนเตรตในระบบ เป็นตัวขัดขวางการสลายตัวของสี
- ที่ค่าโออาร์พีต่ำๆ (-450 ถึง -500 มิลลิโวลท์) การกำจัดสีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และจากการวิเคราะห์ทางเคมีพบสารประกอบ 4 ประเภท ได้แก่ (1.) 2-Aminonapthalene-1,5-disulphonic acid (2.)1,7-diamino-8-naphtho-3,6-disulphonic acid (3.) *p*-diamino-benzene และ (4) cyanuric acid เป็นการยืนยันว่า การสลายตัวของสีเกิดจากการแตกพันธะเอโซ
- สี C.I.Reactive Red 141 เริ่มยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ความเข้มข้นมากกว่า 400 มิลลิกรัม/ลิตร แต่สามารถเลี้ยงเชื้อให้มีความเคยชินกับความเข้มข้นสีที่เพิ่มขึ้นได้

Carliell และคณะ (1996) ศึกษาการกำจัดสีย้อมในระบบจริง โดยป้อนน้ำเสียสีย้อมอัตรา 3 $ม^3$.ต่อวัน ให้แก่ระบบบำบัดน้ำเสียของ Umbilo Sewage Purification Work (USPW) ซึ่งถังปฏิกิริยามีปริมาตร 1,340 $ม^3$ ป้อนสลัดจ์เข้าถัง 40 $ม^3$ ต่อวัน ใช้ระยะเวลาเดินระบบ 151 วัน น้ำผ่านการบำบัดวิเคราะห์ค่าความเข้มสีโซเดียม และซัลไฟด์ นอกจากนี้มีการใช้ชุดทดลองในห้องปฏิบัติการเดินระบบเช่นเดียวกันกับระบบจริงแต่ใช้อัตราส่วนน้ำเสียสีย้อมต่อปริมาณสลัดจ์มากกว่าระบบจริง 2 เท่า ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียผ่านการบำบัดจากระบบจริง

และระบบในห้องปฏิบัติการมีสีใกล้เคียงกัน ไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า แต่มีค่าความเข้มข้นของโซเดียม และซัลไฟด์สูงขึ้น เนื่องจากใช้โซเดียมซัลเฟตปริมาณสูงในกระบวนการย้อม ชุดทดลองในห้องปฏิบัติการเริ่มเสียเสถียรภาพเมื่อมีความเข้มข้นซัลไฟด์ 400 มก.ต่อล. อย่างไรก็ตามไม่ปรากฏว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ในระบบจริงเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับที่ทำให้ระบบเสียเสถียรภาพ

Nigam และคณะ (1996) ศึกษาการลดลงของสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมด้วยกลุ่มจุลชีพ PDW ซึ่งประกอบด้วยจุลชีพ *Alcaligenes faecalis* และ *Commamonas acidovosans* ที่เลี้ยงในจานเพาะเชื้อ ผลการทดลองพบว่ากลุ่มจุลชีพดังกล่าวสามารถกำจัดสีได้เมื่อมีการเติมสารอาหารที่เป็นแหล่งคาร์บอนและย่อยได้ง่าย เช่น แลกโตส แป้ง หรือน้ำเสียจากโรงกลั่นสุรา สารอาหารที่เติมมีบทบาทสำคัญในการช่วยกำจัดสี การใช้สีย้อมเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวจะไม่มีการกำจัดสีเกิดขึ้น โดยจุลชีพสามารถกำจัดสีได้ 76 % หลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 3 วัน แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้กลุ่มจุลชีพดังกล่าวบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม แต่มีสีบางชนิดที่เป็นอันตรายต่อกลุ่มจุลชีพอย่างมาก เช่นสี Remazd Turquoise Blue G 133 เนื่องจากมีส่วนประกอบของทองแดงอยู่มาก และมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าสีย้อมประเภทอื่น

Razo - Flores และคณะ (1997) ศึกษาการลดลงของสีย้อม Mordant Orange 1 (MO1) และสีย้อม Azodisalicylate (ADS) ด้วยระบบยูเอเอสบีขนาดปริมาตร 160 มล. มีการควบคุมอุณหภูมิของระบบที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระบบที่มีการใช้สารอาหาร 2 ชนิด ชนิดแรกให้ชื่อว่า R1 ประกอบด้วย อะซิเตต : ไพรไพโอเนต : บิวทิเรต อัตราส่วน 23 : 34 : 41 ใช้ความเข้มข้นสารอาหาร 1.5 กรัม ซีโอดีต่อลิตร ชนิดที่สองให้ชื่อว่า R2 ใช้กลูโคสเข้มข้น 1.3 กรัม ซีโอดีต่อลิตร ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบที่เกิดขึ้นหลังการสลายตัวของสี MO 1 ด้วยเครื่อง HPLC ตรวจพบสารประกอบ 5 - aminosalichlic acid (5-ASA) และ 1, 4 - phenylenediamine ซึ่งทางคณะผู้วิจัยระบุว่าเป็นสารที่เกิดจากการสลายพันธะเอโซ ส่วนสี ADS ซึ่งประกอบด้วยสาร 5-ASA จำนวน 2 หน่วยต่อโมเลกุลสีสามารถสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ แม้จะไม่มีการเติมสารอาหาร แสดงว่าจุลชีพสามารถใช้สาร 5-ASA ที่มาจากการสลายตัวของสีแทนสารอาหารได้ เมื่อพิจารณาบทบาทของสารอาหารพบว่าสารอาหารทั้งสองชนิดช่วยเพิ่มการกำจัดสี MO1 ได้ แต่ระบบที่เติมกลูโคสสามารถรับอัตราภาระบรรทุก (loading rate) ของสี MO1 ได้เป็นสองเท่าของระบบที่ใช้สารอาหาร R1 แสดงว่า

กลูโคสเป็นสารอาหารที่ดีกว่า ทางคณะผู้วิจัยอธิบายว่ากลูโคสช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ โดยเพิ่มการรีดิวซ์สาร FAD ทำให้การรีดิวซ์พันธะเอโซเกิดได้มากขึ้น

Knapp และ Newby (1995) ศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมโดยกลุ่มจุลชีพผสมที่ประกอบด้วยจุลชีพจีนัส Bacillus และ Clostridium พบว่ากลุ่มจุลชีพที่ใช้สามารถบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่มีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร (A_{390}) ได้อย่างน้อยร้อยละ 77 หลังการบ่มเชื้อในสภาวะไร้ออกซิเจนนาน 15 วัน และสามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 91 หลังจากบ่มเชื้อนาน 35 วัน ชุดทดลองที่เติมเปปโตนเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร มีการกำจัดสีเพิ่มขึ้นมากกว่าไม่เติม แต่การเติมกลูโคสปริมาณมากถึงร้อยละ 2 ไม่ช่วยให้การกำจัดสีเพิ่มมากขึ้นได้อีก กลับจะยับยั้งการทำงานของจุลชีพ และพบว่าการกำจัดสีเกิดได้ดีในช่วงที่แบคทีเรียกำลังเจริญเติบโต น้ำผ่านการบำบัดมีการเปลี่ยนสีจากสีดำเป็นสีเหลือง เมื่อทิ้งให้สัมผัสกับออกซิเจนจะกลับมีสีเพิ่มขึ้น แต่มีโทนสีและการดูดกลืนคลื่นแสงต่างไปจากสีเดิม

โสภา (2540) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการถดสีรีเอโซแอกทีฟในน้ำเสีย ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยระบบยูเอเอสบีแบบ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการสร้างกรด และขั้นตอนการสร้างมีเทน แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุด ได้ผลการทดลองดังนี้

ชุดที่ 1. น้ำย้อมสีดำ ความเข้มสี 150 เอสยู เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีระหว่างการเติมแป้งมัน 500 1,000 และ 1,500 มก./ล. พบว่าการเติมแป้งมันเพิ่มมากขึ้นในช่วง 500-1500 มก./ล. ไม่ช่วยทำให้การกำจัดสีดีขึ้น

ชุดที่ 2 น้ำย้อมสีแดง ความเข้มสี 150 เอสยู เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีระหว่างการเติมแป้งมัน 0 200 และ 500 มก./ล. พบว่าเมื่อมีการเติมแป้งมันในช่วงดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่เติมแป้งมัน

ชุดที่ 3 น้ำย้อมสีน้ำเงิน ความเข้มสี 150 เอสยู มีการเติมแป้งมัน 0 200 และ 500 มก./ล. ผลการทดลองแสดงไปในทิศทางเดียวกับการทดลองชุดที่ 2 น้ำย้อมสีแดง แสดงว่าความแตกต่างระหว่างโทนสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

ชุดที่ 4 ใช้น้ำย้อมสังเคราะห์ ความเข้มสี 150 เอสยู มีการเติมแป้งมัน 0 200 และ 500 มก./ล. พบว่าการเติมแป้งมันเพิ่มให้กับน้ำย้อมสังเคราะห์ที่ไม่มีสารช่วยย้อมเจือปน ทำให้ประสิทธิภาพการถดสีเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับน้ำย้อมจากการย้อมจริง

ชุดที่ 5 ใช้น้ำย้อมสังเคราะห์ มีการเติมแป้งมัน 500 มก./ล. เปรียบเทียบระหว่างความเข้มสี 50 และ 100 เอสยู พบว่าความเข้มสีในช่วง 50 และ 100 เอสยู ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดมากนัก