

บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของกระบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีความเหมาะสมในการใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนสูง แม้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะยังไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งรองรับน้ำได้โดยตรง แต่กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนก็สามารถกำจัดสารอินทรีย์ให้เหลือในปริมาณเท่าๆ กับน้ำเสียชุมชน และสามารถนำไปบำบัดรวมกับน้ำเสียชุมชนได้ นอกจากนี้น้ำทิ้งที่ออกมายังง่ายต่อการบำบัดต่อไปด้วยกระบวนการแบบอื่น ดังนั้นจึงมีการนำเอากระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนไปออกแบบเป็นกระบวนการบำบัดเบื้องต้นก่อนการบำบัดกระบวนการอื่น เช่นกระบวนการเติมอากาศ ซึ่งจะสามารถช่วยลดพลังงานได้มาก

เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเติมอากาศแล้ว กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีข้อดีและข้อเสีย เปรียบเทียบกันได้ดังนี้ (Mudrack and Kunst, 1986)

ข้อดี

- กระบวนการแบบไร้ออกซิเจนต้องการพลังงานในการทำงานน้อยกว่า
- ให้พลังงานกลับคืนมาในรูปของก๊าซชีวภาพ
- สารหลายชนิดที่ไม่อาจย่อยสลายในกระบวนการเติมอากาศได้ เช่น เพคติน จะถูกย่อยสลายได้ในสภาพไร้ออกซิเจน

- เกิดตะกอนส่วนเกินน้อย ทำให้มีค่ากำจัดตะกอนต่ำ

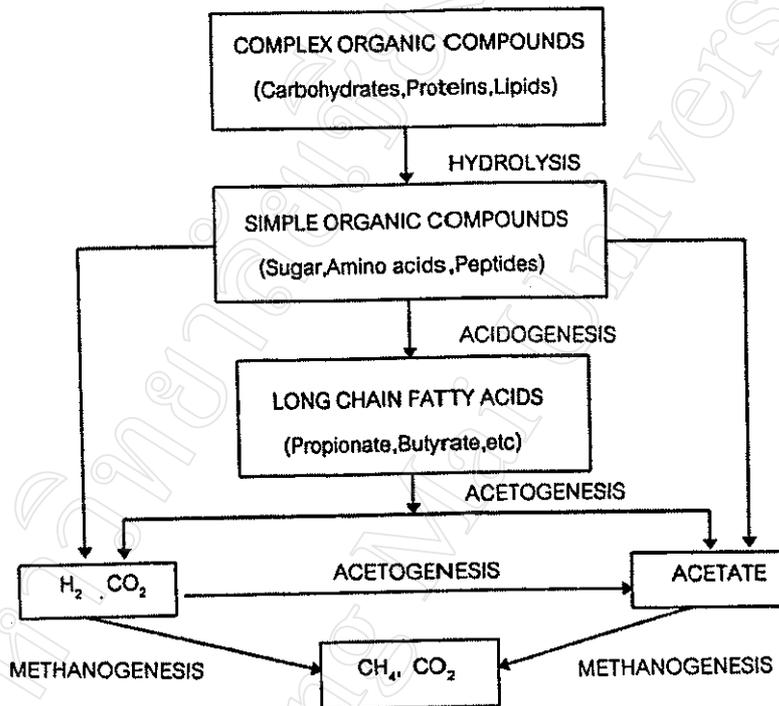
ข้อด้อย

- น้ำเสียที่บำบัดแล้วยังมีสารอินทรีย์สูง ประมาณ 200 - 300 มก.ซีโอดี/ล.
- ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมมากกว่า จึงมีความเสถียรน้อยกว่า

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน กระบวนการหมักเป็นกระบวนการสำคัญอันแรกที้นำไปสู่การลดปริมาณสารอินทรีย์ ได้ผลิตผลสุดท้ายเป็นก๊าซชีวภาพ เช่นก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการหมักเกิดขึ้นได้ในสถานที่ต่างๆ กันตามธรรมชาติ เช่น เกิดในตะกอนของแม่น้ำทะเลสาบ เกิดในดินและในลำไส้ของสัตว์ ซึ่งเป็นผลจากการทำงานร่วมกันของ

จุลินทรีย์ที่ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ในบางกรณีจะมีโปรโตซัว ฟังไจ ยีสต์ร่วมด้วย แต่มีเป็นส่วนน้อย

Novaes (1986) สรุปขั้นตอนของการเมตาโบลิซึมสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในกระบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจนมี 4 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเมตาโบลิซึมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรีย
ในกระบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจน
ที่มา: Novaes, 1986

ขั้นตอนการเมตาโบลิซึมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในกระบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ (Novaes, 1986)

ก. ขั้นตอนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำ หรือ Polymer - type เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิพิดส์ เซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เพคติน แป้ง จะถูกเปลี่ยนรูปโดยน้ำย่อยภายนอกเซลล์ที่ผลิตออกมาจากแบคทีเรียที่ทำหน้าที่หมัก เปลี่ยนให้เป็นสารอินทรีย์อย่างง่าย มีขนาดโมเลกุลเล็กลงละลายน้ำได้หรือที่เรียกว่า Monomer สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์แบคทีเรียได้เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีกรดซิวโอติก น้ำย่อยภายนอกเซลล์ที่ผลิตออกมาจากแบคทีเรียที่ทำหน้าที่หมักนั้น ได้แก่ Cellulases Proteases และ Lipases เป็นต้น

ข. ขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) แบคทีเรียที่ทำหน้าที่หมักจะใช้สารอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนแรกเป็นแหล่งอาหาร และเปลี่ยนต่อไปเป็นกรดอินทรีย์ไขมัน(ได้แก่อะซิเตท บิวทิเรท โพรไพโอเนท) ก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่กว่าอะซิเตท (เช่น แอลกอฮอล์ สารประกอบอะโรมาติกบางชนิด เช่น เบนโซเอท) ขั้นตอนนี้มีผลทำให้พีเอชของระบบลดลงเนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์ ค่าซิวโอติกในขั้นตอนนี้ลดลงประมาณร้อยละ 10

ชนิดของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่หมักในขั้นตอนที่หนึ่งและสองพบว่าแบคทีเรียที่พบในตัวอย่างตะกอนจากถังหมักตะกอน มักจะเป็นแบคทีเรีย Facultative Bacteria อยู่ในวงศ์ Bacillaceae กับ Lactobacillaceae และ Enterobacteriaceae โดยพบ Bacillaceae เป็นส่วนใหญ่ และอยู่ในสกุล *Bacteroides*, *Clostridium*, *Butyrivibrio*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* ผลผลิตจากการเมตาโบลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นสารเริ่มต้นและเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าระบบมีความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ หรือมีไฮโดรเจนออกซิเจนน้อย จะได้ผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ชนิด Short-Chain Fatty Acids (เช่น อะซิเตท) และคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน แต่ถ้าระบบมีความดันย่อยของไฮโดรเจนสูง หรือมีไฮโดรเจนออกซิเจนสูง ซึ่งทำให้ค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 4 จะได้ผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ชนิด Long-Chain Fatty Acids (เช่น โพรไพโอเนท แลคเตท และแอลกอฮอล์)

ค. ขั้นตอนของการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) กรดอินทรีย์ที่ใหญ่กว่าอะซิเตทจากขั้นตอนที่สองจะถูกใช้เป็นแหล่งอาหารและเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และอะซิเตท โดยแบคทีเรียอะซิโตเจเนซิสที่ผลิตไฮโดรเจน (H_2 -Producing Acetogenic Bacteria) และในขณะเดียวกันก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีในระบบก็จะถูกเปลี่ยนให้เป็นอะซิเตทโดยแบคทีเรียอะซิโตเจเนซิสที่ใช้ออกซิเจน (H_2 -Consuming Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจนส่วนใหญ่ที่พบจะเป็น *Desulfovibrio*, *Syntrophobacter Wolinii* และ *Syntrophomonas*

wolfei ส่วนแบคทีเรียที่ใช้ไฮโดรเจนที่พบส่วนใหญ่จะเป็น *Clostridium aceticum*, *Acetobacterium woodii*, *Clostridium thermoaceticum* และ *Butyribacterium methylotrophicum* แบคทีเรียอะซิโตเจนจะเจริญเติบโตได้ดีเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีความดันย่อยไฮโดรเจนต่ำ หรือมีปริมาณไฮโดรเจนอิสระน้อย

ง. ขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) โดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนสองกลุ่ม กลุ่มแรก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่มีในระบบจะถูกรีดิวซ์โดยแบคทีเรียเมทาโนเจนที่รีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 - Reducing Methanogenic Bacteria) กลายเป็นก๊าซมีเทนและน้ำ กลุ่มที่สอง อะซิเตทจะถูกแบคทีเรียเมทาโนเจนที่ใช้อะซิเตท (Acetoclastic Methanogenic Bacteria) ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ผลิตผลเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียเมทาโนเจนเป็นกลุ่มที่มีความหลากหลายของสปีชีส์ มีรูปร่างต่างกัน จัดอยู่ในอาณาจักร Archaeobacteria Kingdom และเป็น Obligate Anaerobes แบคทีเรียนี้มีเพียงวงศ์เดียว คือ Methanobacteriaceae และแบ่งเป็นสี่สกุลได้แก่

<i>Methanosarcina</i>	มีรูปร่างกลม (Coccus) เมื่อรวมตัวกันเรียกเป็น Sarcina
<i>Methanobacterium</i>	มีรูปร่างแท่งสั้น (Bacillus)
<i>Methanococcus</i>	มีรูปร่างกลมอิสระ
<i>Methanospirillum</i>	มีรูปร่างเกลียว (Spirillum)

มีการพบว่าแบคทีเรียอะซิโตเจนและแบคทีเรียเมทาโนเจนจะอยู่ใกล้ชิดกัน อาศัยร่วมกันแบบพึ่งพากัน (Symbiosis) โดยแบคทีเรียเมทาโนเจนจะใช้ไฮโดรเจน อะซิเตท และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่แบคทีเรียอะซิโตเจนผลิตออกมาใช้เป็นสารอาหาร ทำให้ความดันย่อยไฮโดรเจนต่ำ มีค่าพีเอชไม่ต่ำมากจนเกินไป เป็นสภาพที่เหมาะสมที่แบคทีเรียอะซิโตเจนจะเจริญเติบโตได้

แบคทีเรียเมทาโนเจนเติบโตได้ดีที่สภาพค่า Redox Potential ประมาณ -300 mV โดยที่อุณหภูมิ $15 - 35^\circ \text{C}$ แบคทีเรียพวกเมโซฟิลิก (Mesophilic Bacteria) จะเจริญเติบโตได้ดี และจะตายที่อุณหภูมิ $40 - 45^\circ \text{C}$ เนื่องจากโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักของน้ำย่อยเริ่มถูกเปลี่ยนแปลง ส่วนที่อุณหภูมิ $55 - 65^\circ \text{C}$ แบคทีเรียพวกเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic Bacteria) จะเติบโตได้ดี ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตและการเกิดก๊าซมีเทนของแบคทีเรีย

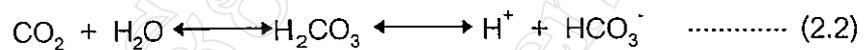
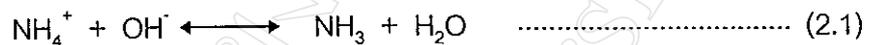
เมทาโนเจนคือ 6.8 - 7.2 ในขณะที่แบคทีเรียสร้างกรดมีช่วงค่าพีเอชเหมาะสมที่กว้างกว่า คือมีค่าประมาณ 5.3 - 6.3

ส่วนใหญ่ของแบคทีเรียเมทาโนเจนจะใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน มีเพียง 3 ชนิดเท่านั้นที่ใช้อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน คือ *Methanosarcina* sp, *Methanotrix soehngeni* และ *Methanococcus mazei* โดยแบคทีเรีย *Methanosarcina* จะย่อยสลายอะซิเตท ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เมทานอล และเมทิลซัลไฟด์ได้ ในขณะที่ชนิด *Methanotrix soehngeni* ซึ่งมีรูปร่างเป็นแท่งจะสามารถย่อยได้เพียงอะซิเตท *Methanotrix* มี Specific Activity ต่ำกว่า *Methanosarcina* 3 - 5 เท่า ดังนั้นจะพบ *Methanotrix* ในปริมาณมากเฉพาะเมื่อระบบมีความเข้มข้นของอะซิเตทต่ำ ค่า Specific Activity ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศทั่วไปมีค่าประมาณ 1 กก.ซีไอดี/(กก.มวลชีวภาพ.วัน) ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ซีไอดีที่ถูกกำจัด 1 ปอนด์ (0.454 กก.) จะเกิดก๊าซมีเทน 5.62 ฟุต³ (0.16 ม³) (Eckenfelder, 1989) แบคทีเรียเมทาโนเจนที่ใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จะสร้างก๊าซมีเทน 1/3 ส่วน ในขณะที่แบคทีเรียเมทาโนเจนที่ใช้อะซิเตทจะสร้างก๊าซมีเทน 2/3 ส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดในระบบ (Bitton, 1994)

ในกรณีน้ำเสียที่ย่อยสลายง่าย เช่นน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลหรือแป้ง ซึ่งถูกไฮโดรไลซิสและถูกเปลี่ยนเป็นกรดได้ง่าย จึงอาจเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์มากจนทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลงจนแบคทีเรียเมทาโนเจนไม่สามารถทำงานได้ ขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนจะเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการย่อยสลาย (Rate - Limiting) กรณีเช่นนี้มักจะใช้วิธีแยกถังบำบัดเป็น 2 ขั้นตอนโดยแยกขั้นตอนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดไว้ที่ถังหนึ่ง ซึ่งถังนี้อาจมีค่าพีเอชต่ำถึง 3.8 ค่าซีไอดีส่วนใหญ่มาจากกรดอินทรีย์ น้ำที่ออกจากถังนี้สามารถเข้าถังที่สองซึ่งเป็นถังสร้างมีเทนได้เลยโดยไม่ต้องปรับพีเอช

ในกรณีน้ำเสียประกอบด้วยสารที่ยากต่อการไฮโดรไลซิส เช่นมีเซลลูโลสหรือไขมันสูง ขั้นตอนของการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการย่อยสลาย กรณีเช่นนี้ไม่มีความจำเป็นต้องแยกถังเป็น 2 ขั้นตอน และในกรณีที่น้ำเสียมีกำลึงบัพเฟอร์สูง เช่นน้ำเสียของโรงงานที่ใช้โซดาในการผลิต พีเอชของระบบรวมจะอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียเมทาโนเจนทำงานได้ ก็ไม่มีความจำเป็นต้องแยกถังเป็น 2 ขั้นตอน

การย่อยสลายโปรตีนซึ่งประกอบขึ้นจาก Long - Chain ของกรดอะมิโนนั้น ขั้นตอนการไฮโดรไลซิสของน้ำย่อยภายนอกเซลล์ซึ่งคือ Proteases จะสลาย Peptide Bond ของกรดอะมิโนที่อยู่ติดกัน ทำให้กรดอะมิโนแยกออกจากกัน และในขั้นตอนการเปลี่ยนรูปต่อไป ไนโตรเจนที่มีอยู่ในอะมิโนกรุป (-NH₂Group) จะถูกแยกออกมาและเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย เมื่อแอมโมเนียทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ไฮดรอกไซด์ไอออน ตามสมการ 2.1



เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ไบคาร์บอเนตไอออน ตามสมการ 2.2 มีผลทำให้ค่าสภาพความเป็นต่างของระบบสูงขึ้น (Gray, 1989)

แบคทีเรียเมทาโนเจนเปลี่ยนผลผลิตสุดท้ายของขั้นตอนอะซิโตเจเนซิสให้เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเฉื่อยติดไฟได้ ไม่เป็นพิษ ไม่ละลายน้ำ แยกออกจากน้ำได้ง่าย ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้ดี มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่แยกออกจากน้ำ เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ได้ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻) มีผลทำให้ค่าสภาพความเป็นต่างของระบบสูงขึ้นกว่าเดิม

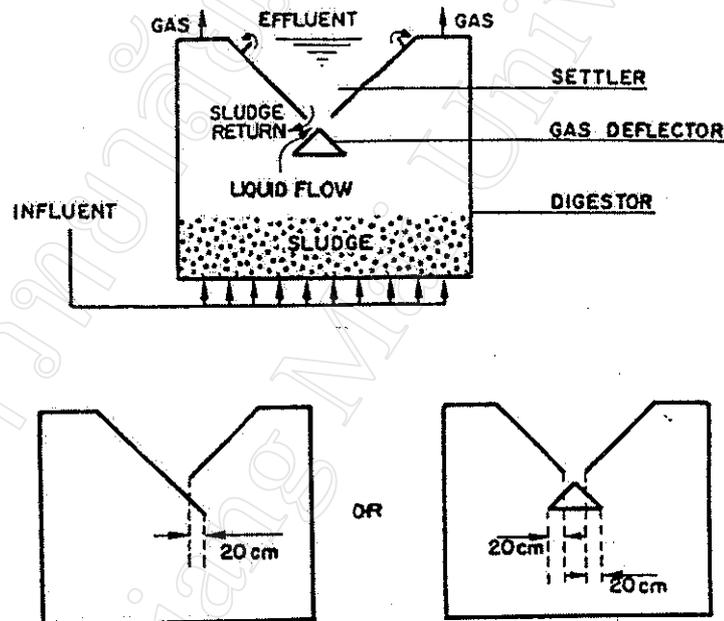
แบคทีเรียสร้างกรดมีส่วนเป็นอย่างมากในการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช อุณหภูมิของระบบมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าแบคทีเรียเมทาโนเจนมาก และเมื่อประกอบกับแบคทีเรียเมทาโนเจนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม จึงทำให้แบคทีเรียเมทาโนเจนเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายของระบบ (Gray, 1989)

ในสภาพไร้ออกซิเจนมักจะมีแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria, SRB) อยู่ร่วมกันกับแบคทีเรียเมทาโนเจน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะย่อยสลายกรดอินทรีย์ได้ อะซิเตท ไฮโดรเจนและซัลไฟด์ ซึ่งอะซิเตทนี้ถูกนำไปใช้ได้โดยแบคทีเรียเมทาโนเจน แบคทีเรียนี้พบได้ 3 สกุลคือ *Desulfovibrio* , *Desulfotomaculum* และ *Desulfobulbus* พบว่าในสภาพที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง แบคทีเรียเมทาโนเจนจะถูกยับยั้งอันเนื่องมาจากความเป็นพิษของซัลไฟด์ที่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตผลิตออกมา และเนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเติบโตได้ดีที่มีความเข้มข้น

ซัลเฟตสูง จึงสามารถแข่งขันในการแย่งไฮโดรเจนจากแบคทีเรียเมทาโนเจนได้ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความสำคัญต่อขบวนการสร้างมีเทน เพราะอาจจะทำตัวเป็นแบคทีเรียอะซิโตเจนในการย่อยสลายกรดอินทรีย์แล้วให้อะซิเตทที่แบคทีเรียเมทาโนเจนนำไปใช้ได้ แต่ในบางกรณีจะแข่งขันกับแบคทีเรียเมทาโนเจน ซึ่งเท่ากับเป็นการยับยั้งขบวนการสร้างมีเทน

2.2 ถึงปฏิบัติการแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

ลักษณะถึงปฏิบัติการยูเอเอสบีโดยทั่วไปจะเป็นถึงรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือทรงกระบอกก็ได้ มีลักษณะการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ถึงปฏิบัติการยูเอเอสบี

ที่มา: Souza, 1986

หลักการการทำงานโดยสังเขปของระบบยูเอเอสบีมีดังนี้

ก. น้ำเสียจะเข้าที่ด้านล่างของถังและกระจายอย่างสม่ำเสมอไหลจากด้านล่างขึ้น

ด้านบน

ข. น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตะกอนล่าง (Sludge Bed) ที่มีความหนาแน่นตะกอนจุลินทรีย์สูง จุลินทรีย์ในชั้นตะกอนล่างนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดเซลล์จุลินทรีย์

ใหม่และก๊าซชีวภาพ ความเร็วของน้ำเสียและฟองก๊าซที่เกิด จะพาตะกอนจุลินทรีย์ลอยขึ้นป่วนขึ้นไปยังชั้นตะกอนลอย (Sludge Blanket) เป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียได้มากขึ้น

ค. ตะกอนจุลินทรีย์และก๊าซที่ลอยขึ้นไปชั้นบนจะกระทบกับแผ่น GSS (Gas -Solids Separator) ที่ทำหน้าที่แยกก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียออกจากกัน ก๊าซจะถูกแยกไปรวบรวมที่บริเวณเก็บก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์จะตกกลับลงมายังชั้นล่าง และน้ำเสียจะผ่านขึ้นไปยังส่วนตกตะกอนที่อยู่ชั้นบนสุด แผ่น GSS ปกติจะมีความเอียงประมาณ 50 องศา และเหลื่อมกันไม่น้อยกว่า 20 ซม.

ง.น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลล้นออกไปเป็นน้ำออกผ่านเวียร์ ตะกอนแขวนลอยในน้ำส่วนนี้ถ้ามีก็จะตกตะกอนลงมายังแผ่น GSS แล้วไหลกลับลงสู่ถังปฏิกริยาต่อไป ความสูงของส่วนตกตะกอนนี้จะเท่ากับความสูงของถังตกตะกอนทั่วไปคือประมาณ 1.0 - 1.5 ม.

ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบีเช่นนี้ ทำให้สามารถเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์ไว้ภายในถังได้มาก ตะกอนจุลินทรีย์จะพัฒนาต่อไปเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดประมาณ 1 - 6 มม. มีลักษณะเด่นคือตกตะกอนได้ดีและเร็ว ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กและเบาจะถูกชะล้างหลุดออกไปกับน้ำออก

Pol and Lettinga (1986) รายงานว่าระบบยูเอเอสบีเป็นระบบที่มีการทำงานร่วมกันของถังปฏิกริยาแบบ Sludge Bed Reactor กับกระบวนการการกรองผ่านชั้นตะกอนแบบไร้อากาศ

ระบบยูเอเอสบีมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือสามารถใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่เกิดตามฤดูกาลเก็บเกี่ยว เพราะสามารถเก็บเม็ดตะกอนไว้ได้เป็นเวลานานเมื่ออยู่ในช่วงนอกฤดูกาล และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ภายในไม่กี่สัปดาห์ ซึ่งคุณสมบัตินี้ไม่มีในระบบแบบเติมอากาศหรือกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบอื่น

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ก. อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับแบคทีเรียในกระบวนการไร้อากาศ มี 2 ช่วงคือ ที่ช่วงเมโซฟิลิค อุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 38 - 40 °ซ และสำหรับช่วงเทอร์โมฟิลิค อุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 50 - 60 °ซ (Pol and Lettinga, 1986) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระทันหันของน้ำเสียที่เข้าระบบแม้

เพียงเล็กน้อยจะมีผลยับยั้งต่อการทำงานของแบคทีเรียเมทาโนเจน และจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบได้

ข. พีเอช

ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 6.6 - 7.6 ส่วนแบคทีเรียสร้างกรดจะสามารถปรับตัวได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า ดังนั้นการควบคุมพีเอชของระบบจึงเน้นให้ความสำคัญต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนมากกว่า Speece *et al.* (1986) รายงานว่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทนของกระบวนการไร้อากาศจะลดลงทันทีที่พีเอชมีค่าต่ำกว่า 6 และสูงกว่า 8 Souza (1986) รายงานว่าควรรักษาระดับพีเอชในถังให้สูงกว่า 6.2 เสมอเพื่อไม่ให้เกิดการยับยั้งกระบวนการเกิดมีเทน

ค. กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA) และความเป็นด่าง (Alkalinity)

กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียสร้างกรดควรมีค่า 200-400 มก./ล. กรดอะซิติก กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียเมทาโนเจนได้ และทำให้มีค่าพีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรีย การเพิ่มขึ้นของค่ากรดไขมันระเหยของระบบจึงเป็นตัวชี้เบื้องต้นถึงสภาพของระบบที่กำลังจะล้มเหลว ดังนั้นสภาพความเป็นด่างซึ่งแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบ ปกติควรมีความเป็นด่าง 1,500 - 2,000 มก./ล. และอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่างถ้าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ามีบัฟเฟอร์สูงระบบทำงานได้ดี แต่ถ้ามากกว่า 0.8 แสดงว่ามีบัฟเฟอร์ต่ำ

ง. อาหารเสริม (Nutrients)

กระบวนการไร้ออกซิเจนต้องการธาตุไนโตรเจนกับฟอสฟอรัส ในอัตราส่วนค่าซีไอดีต่อค่าไนโตรเจนต่อค่าฟอสฟอรัสอย่างน้อยเท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 และควรมีอาหารเสริมประเภทเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ ในรูปที่นำไปใช้ได้ปริมาณที่น้อยแต่เพียงพอ Souza (1986) แนะนำค่าซีไอดีต่อไนโตรเจน ควรน้อยกว่า 70 และค่าซีไอดีต่อฟอสฟอรัส ควรน้อยกว่า 350

จ. สารพิษ (Toxics)

กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศสามารถทนต่อสารพิษได้ระดับหนึ่ง โดยสารพิษควรมีความเข้มข้นที่ยอมรับได้ และถ้ามีเวลาปรับสภาพมากพอ แบคทีเรียจะสามารถปรับสภาพและทน

ต่อสารพิษได้มากขึ้น (Souza, 1986)

อิออนบวกของโซเดียม โปตัสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ที่ความเข้มข้นสูงจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยอิออนของแมกนีเซียม แคลเซียม ซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่ามีความเป็นพิษมากกว่าโซเดียมและโปตัสเซียม 10 เท่า สารโลหะหนัก เช่นแมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิเกิล โคบอลท์ ทองแดง และโครเมียม เป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยความรุนแรงขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำและปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเองในถัง เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักได้เป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษ Lin (1993) ศึกษาผลของโครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และนิเกิลที่มีผลต่อการเกิดกรดไขมันระเหยในถังหมักตะกอนแบบไร้อากาศ พบว่าความเป็นพิษที่มีผลต่อการเกิดกรดอะซิติก (HAc) คือ ทองแดง > สังกะสี > โครเมียม > แคดเมียม > ตะกั่ว > นิเกิล และที่มีผลต่อการเกิดกรด n - Butyric Acid (n - Hbu) คือ ทองแดง > สังกะสี > โครเมียม > แคดเมียม > นิเกิล > ตะกั่ว ตามลำดับ และกรดอะซิติกจะเกิดเพิ่มมากขึ้นได้เมื่อนิเกิลมีความเข้มข้นน้อยกว่า 300 มก./ล.

การย่อยสลายโปรตีนที่มีไนโตรเจนอยู่ในโมเลกุลในสภาพไร้อากาศ จะได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนีย ซึ่งจะอยู่ในรูป NH_4^+ หรือ NH_3 ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 แอมโมเนียจะอยู่ในรูป NH_3 และถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 จะอยู่ในรูป NH_4^+ พบว่าปริมาณแอมโมเนียในโตรเจน 700 มก./ล. จะเริ่มมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน และที่ความเข้มข้น 1,700 - 2,000 มก./ล. จะมีผลทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนหยุดการทำงานได้ (Koster and Lettinga, 1988)

ซัลไฟด์จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนในกระบวนการไร้อากาศ ถ้าน้ำเสียมีซัลไฟด์มากหรือเกิดการย่อยสลายซัลเฟตได้ซัลไฟด์ปริมาณมาก แบคทีเรียจะถูกยับยั้งถ้ามีความเข้มข้นซัลไฟด์มากกว่า 200 มก./ล. อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตควรมีค่าสูงกว่า 7 - 10 การลดความเป็นพิษอาจทำได้โดยเจือจางน้ำเสียหรือทำให้ตกตะกอนก่อนที่น้ำเสียจะเข้าระบบ

Speece *et al.* (1986) ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารพิษชนิดต่างๆ ที่จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียและศักยภาพในการปรับสภาพของแบคทีเรียหลังการได้รับสารพิษ ดังนี้

- พบว่าแอมโมเนียในโตรเจนไม่ถูกเปลี่ยนรูปในกระบวนการไร้ออกซิเจน เมื่อระบบได้รับแอมโมเนียในโตรเจนที่ความเข้มข้น 10,000 มก./ล. การเกิดก๊าซมีเทนจะค่อย ๆ ลดลงจนเป็น

ศูนย์ หลังจากนั้นประมาณ 10 วัน แบคทีเรียสามารถปรับสภาพและเริ่มเกิดก๊าซใหม่ได้ การปรับสภาพและเริ่มเกิดก๊าซได้ใหม่ในเวลาอันสั้นคาดว่าเกิดจากการชะล้างแอมโมเนียออกไปจากระบบ และที่ความเข้มข้น 12,000 มก./ล. การเกิดก๊าซเป็นศูนย์และไม่เกิดอีกเลย

- ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 10 มก./ล. การเกิดก๊าซเริ่มเป็นศูนย์ และหลังจากทิ้งให้แบคทีเรียปรับสภาพ 35 วัน ระบบก็เริ่มเกิดก๊าซได้อีกครั้ง

- การให้คลอโรฟอร์ม 2.5 มก./ล. แก่ระบบครั้งแรกพบว่ามีความเป็นพิษอย่างรุนแรง แต่การให้คลอโรฟอร์มครั้งที่ 2 3 และ 4 พบว่าการฟื้นสภาพทำได้เร็วขึ้น แสดงว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนมีคุณสมบัติของการปรับตัวต่อความเป็นพิษสูง และจะแสดงคุณสมบัตินี้ต่อสารพิษชนิดอื่นด้วย

- พบว่าอัตราการเกิดก๊าซลดลงทันทีที่พีเอชของระบบต่ำกว่า 6 และสูงกว่า 8

Koster and Lettinga (1988) ศึกษาการย่อยสลายในสภาพไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมมันฝรั่งซึ่งมีโปรตีนสูง โดยใช้เม็ดตะกอนจากถังยูเอเอสบีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำตาลปีทในถังปฏิกริยาขนาด 4.5 ลิตร พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน 1,900 - 2,000 มก./ล. ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโปรตีน จะทำให้การเกิดก๊าซมีเทนหยุดชะงักแต่หลังจากมีการปรับตัวเป็นเวลา 2,800 ชั่วโมงซึ่งประกอบด้วย 1,200 ชั่วโมงที่กิจกรรมของแบคทีเรียเป็นศูนย์ และ 1,600 ชั่วโมงที่ระบบเกิดก๊าซมีเทนแต่เกิดในปริมาณที่น้อยมาก แบคทีเรียสร้างมีเทนที่ปรับตัวแล้ว สามารถสร้างก๊าซมีเทนได้แม้ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนสูงสุด 11,831 มก./ล. การเกิดก๊าซจะเริ่มเป็นศูนย์ที่ความเข้มข้นสูงสุด 15,963 มก./ล. แสดงว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนหลังจากมีการปรับตัวแล้วจะสามารถรับความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนได้สูงกว่าก่อนการปรับตัว 6.2 เท่า และพบว่าที่ความเข้มข้น 5,229 มก./ล. จะมีค่า Specific Methanogenic Activity สูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจน 4,051 - 5,734 มก./ล. แบคทีเรียสร้างกรดไม่ได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่กิจกรรมของแบคทีเรียสร้างมีเทนหายไปร้อยละ 56.6 ทำให้เกิดการสร้างกรดไขมันระเหยภายในระบบมาก และถ้าระบบไม่มี Buffer Capacity แล้ว จะมีผลทำให้ค่าพีเอชตกลงต่ำกว่าช่วงที่แบคทีเรียสร้างมีเทนจะทนได้

2.4 การเริ่มต้นระบบบยเอเอสบี

Pol and Lettinga (1986) แนะนำการเริ่มต้นระบบบยเอเอสบี ดังนี้

ก. การเติมตะกอนหัวเชื้อ (Seed Sludge)

- ควรมีวัสดุที่เหมาะสมที่แบคทีเรียจะเกาะติดได้ในการเริ่มเกาะเป็นกลุ่ม
- กรณีใช้ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ควรใช้ตะกอนที่มีค่าความเข้มข้นมากกว่า 60 กก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ม³
- การเติมเม็ดตะกอน (Granules) ในปริมาณเล็กน้อยเพิ่มลงไปในตะกอนหัวเชื้อ จะช่วยเร่งขบวนการเกิดเม็ดตะกอนได้

ข. วิธีการดำเนินการ

- ตะกอนที่ล้นออกไปกับน้ำออก ไม่ควรนำหมุนเวียนกลับเข้าระบบ
- ควรมีการหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าระบบ หรือทำการเจือจางเมื่อซีไอดีของน้ำเสียนี้อายุมากกว่า 5,000 มก./ล.
- ค่อย ๆ เพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทีละขั้น หลังจากทีค่าซีไอดีลดลงได้อย่างน้อยร้อยละ 80 ของแต่ละขั้นเสมอ
- ควบคุมความเข้มข้นอะซิเตทให้ต่ำกว่า 1,000 มก./ล.
- กรณีใช้ตะกอนหัวเชื้อแบบเข้มข้น (>60 กก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ม³) ควรใช้ในปริมาณ 12-15 กก.ตะกอนแขวนลอยระเหย(VSS)/ม³ และในกรณีใช้ตะกอนหัวเชื้อแบบเจือจาง (<40 กก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ม³) ควรใช้ในปริมาณ 6 กก.ตะกอนแขวนลอยระเหย/ม³

ค. ลักษณะของน้ำเสีย

- ค่าซีไอดีของน้ำเสียไม่ควรต่ำกว่า 1,000 มก./ล. ทั้งนี้เพื่อให้แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ และค่าซีไอดีในช่วงที่ต่ำกว่าจะทำให้เกิดเม็ดตะกอนได้เร็วขึ้น
- ของแข็งแขวนลอยที่มีกระจุกกระจายมากในน้ำเสีย จะมีผลในการชะลอหรือหยุดการเกิดเม็ดตะกอนได้
- น้ำเสียที่มีคาร์โบไฮเดรตละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่ จะเกิดเม็ดตะกอนได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหย (VFA) สูง และในกรณีที่น้ำเสียนี้อายุโปรตีนสูงควรควบคุมให้ค่าพีเอชในถังมีค่ามากกว่า 6.5 เพื่อให้สามารถย่อยสลายโปรตีนได้สมบูรณ์
- น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียมสูง จะเกิดการตกผลึกของ CaCO_3 , CaHPO_4 และ MgNH_4PO_4 ทำให้เม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นมี Ash - content สูง

ง. สภาพแวดล้อม

- สำหรับช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิก อุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 38 - 40 °ซ และสำหรับช่วงอุณหภูมิ เทอร์โมฟิลิก อุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 50 - 60 °ซ
- ค่าพีเอชในถังควรรักษาระดับให้สูงกว่า 6.2 เสมอ
- ควรมีสารอาหารให้เพียงพอ และอยู่ในรูปที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้
- ถ้าน้ำเสียมีสารที่เป็นพิษ ควรมีความเข้มข้นที่ยอมรับได้หรือมีเวลามากพอที่จะให้แบคทีเรียปรับสภาพ

Souza (1986) แนะนำการเริ่มต้นระบบยูเอเอสบีดังนี้

ก. หลังจากการ Inoculation ปริมาณเม็ดตะกอนที่เกิดถ้ามีปริมาณร้อยละ 10 - 15 ของถังก็เพียงพอต่อการเริ่มต้นระบบ

ข. ถ้าไม่มีตะกอนคุณภาพดีเป็นหัวเชื้อ ก็ให้ใช้วัสดุอื่นที่มีแบคทีเรียแทนได้ เช่น ตะกอนจากถังหมักตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ตะกอนจากบ่อเกราะน้ำเสียดิบ มูลสัตว์ที่ยังไม่ย่อยสลายก็ได้ แต่จะใช้เวลาในการ Inoculation นานมากขึ้น และอาจนานถึง 6 เดือน

ค. ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูง ควรเริ่มระบบด้วยค่าอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ไม่เกิน 0.5 กก.ซีโอดี/(ม³.วัน) หรือไม่เกิน 0.05 - 0.1 กก.ซีโอดี/(กก.ตะกอนแขวนลอย.วัน)

ง. เพิ่มอัตราไหลของน้ำเสียได้ต่อเมื่อก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบที่น้ำหนักพอใจ หรือต่อเมื่อมีค่ากรดระเหยง่ายในระบบต่ำคือน้อยกว่า 500 มก./ล. แต่ถ้ากรดระเหยง่ายในระบบเพิ่มอย่างรวดเร็วควรทำการลดอัตราการไหลของน้ำเสียลง

จ. ในกรณีน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำเช่นน้ำเสียชุมชน อาจเริ่มระบบโดยให้มีความเร็วของของเหลวในถังปฏิกิริยา (Upflow Liquid Velocity) เป็นครึ่งหนึ่งของค่าที่ออกแบบ แต่ต้องระวังเม็ดตะกอนหลุดออกไปกับน้ำออก

ฉ. เม็ดตะกอนส่วนเกินควรเก็บรักษาไว้เพราะอาจจำเป็นต้องถูกนำมาใช้ใหม่ในกรณีที่ระบบมีปัญหาในการทำงาน หรืออาจนำไปใช้เป็นตะกอนหัวเชื้อในระบบยูเอเอสบีอื่นก็ได้

2.5 การออกแบบและควบคุมการทำงานระบบยูเอเอสบี

Souza (1986) แนะนำการออกแบบ และการควบคุมการทำงานของระบบยูเอเอสบีดังนี้

ก. ถ้าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยยังมีน้อย ปัญหาที่จะเกิดต่อระบบยังมีน้อย ค่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยมีค่าวิกฤติในการออกแบบ 2 ค่าคือ ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียควรน้อยกว่า 1,000 มก./ล. และอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยต่อซีโอดีควรมีค่าน้อยกว่า 0.5 ถ้าน้ำเสียมีของแข็งแขวนลอยขึ้นใหญ่อาจจำเป็นต้องมีระบบบำบัดเบื้องต้นหรือมีระบบไฮโดรไลซิสก่อน

ข. ถ้าน้ำเสียมีความเป็นพิษสูงควรใช้เทคนิคการเจือจางน้ำเสียก่อนหรือให้มีกระบวนการ Pre - Acidification และในกรณีที่ระบบมีการหมุนเวียนให้น้ำออกย้อนกลับเข้าถัง ก็ให้ให้น้ำออกที่จะหมุนเวียนกลับเข้าถังถูกเจือจางโดยน้ำเสียชนิดอื่นเสียก่อน

ค. หากจำเป็นก็ควรมีถังปรับสภาพ (Equalization Tank) เพื่อให้น้ำเสียเข้ามีคุณสมบัติสม่ำเสมอ การหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าระบบใหม่ก็เป็นการปรับสภาพอย่างหนึ่งด้วย เพราะน้ำออกมีคุณภาพที่สม่ำเสมอว่าน้ำเข้าทำให้น้ำที่ผสมแล้วมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ในกรณีที่น้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลมาก ควรออกแบบให้ใช้ถังยูเอเอสบีหลายถังวางแบบขนานกันและให้ถังสุดท้ายเป็นถังปฏิบัติการสำหรับรับปริมาณน้ำส่วนที่เปลี่ยนแปลง

ง. เมื่อต้องการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นวัตถุประสงค์หลัก ก็ไม่จำเป็นต้องสูบน้ำออกส่วนเกินออก แต่ถ้ามีวัตถุประสงค์ที่จะบำบัดน้ำเสีย อาจจำเป็นต้องสูบน้ำออกส่วนเกินออกบ้างเป็นครั้งคราวเพื่อไม่ให้มีของแข็งแขวนลอยหลุดออกไปกับน้ำออกมาก

จ. ค่าที่ใช้ในการออกแบบ

- ค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ปลอดภัยสูงสุดในการออกแบบไม่เกิน 15 - 20 กก.ซีโอดี/(ม³ .วัน)
- ค่าความเร็วของของเหลวในถัง (ULV) สูงสุดไม่ควรเกิน 1.2 - 1.5 ม./ชม.
- สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ดังปฏิบัติการควรมีความสูงประมาณ 6 ม. และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำถึงควรสูงประมาณ 4.5 ม.
- ส่วนของการตกตะกอน ไม่มีความจำเป็นต้องสูงเกินกว่า 1.5 ม.

- ท่อน้ำเข้าควรอยู่สูงจากกันถึง 10 - 20 ซม. ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงการเกิดก๊าซจะสูง ดังนั้นการออกแบบการกระจายน้ำ 7 - 10 ม²/จุด ก็เพียงพอแล้ว และถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำ ควรออกแบบให้มีการกระจายน้ำ 1 - 2 ม²/จุด

- ถังไม่ควรมีขนาดใหญ่กว่า 1,000 - 1,500 ม³ เพื่อไม่ให้มีปัญหาด้านการก่อสร้าง การดูแล บำรุงรักษา และการเริ่มต้นระบบ

จ. การประมาณการค่าการกำจัดซีโอดี

น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้อยเช่น น้ำเสียชุมชน ค่ากำจัดซีโอดีปกติมีค่าร้อยละ 60 - 70 และสำหรับน้ำเสียความเข้มข้นสูง อาจได้ค่ากำจัดซีโอดีร้อยละ 80 - 90

ข. การประมาณการปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิด

ที่สภาวะคงที่ตามทฤษฎี ก๊าซมีเทนจะเกิดประมาณ 0.35 ล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ก๊าซมีเทนส่วนหนึ่งอาจจะละลายน้ำหรือหลุดหนีออกไปกับน้ำออก ในน้ำเสียเข้มข้นสูงจะมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบร้อยละ 55 - 65 ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำเสียความเข้มข้นต่ำจะมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบร้อยละ 75 ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

ข. การเกิดตะกอน

น้ำเสียชุมชนซึ่งเป็นน้ำเสียความเข้มข้นต่ำจะเกิดตะกอนประมาณร้อยละ 30 ของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย

ระบบยูเอเอสบีถึงแม้จะมีประสิทธิภาพสูงสามารถกำจัดซีโอดีได้ถึงร้อยละ 80 - 90 แต่ก็จำเป็นต้องมีระบบภายหลัง (Post-Treatment) เพื่อให้น้ำที่บำบัดแล้วมีคุณภาพตามที่กำหนด เพราะระบบยูเอเอสบีไม่สามารถบำบัดแอมโมเนีย เชื้อโรค ไนโตรเจนกับฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้ และสารอินทรีย์ในน้ำออกก็ยังมีค่าสูง ระบบภายหลังอาจได้แก่ ถังกรองทราย ระบบบ่อเติมอากาศ ระบบบ่อฝิ่ง ระบบตะกอนเร่ง เป็นต้น Souza (1986) รายงานว่าน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลที่มีการบำบัดโดยระบบยูเอเอสบีโดยมีระบบถังเกรอะและถังกรองแบบไร้อากาศเป็นระบบภายหลังพบว่าเฉพาะระบบยูเอเอสบีกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 76 ระบบภายหลังกำจัดได้ร้อยละ 35 และระบบรวมทั้งหมดสามารถกำจัดได้ร้อยละ 84

ในน้ำเสียบางประเภทที่สารอินทรีย์ละลายได้เพียงบางส่วน หรือมีสารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ระบบยูเอเอสบีจะถูกออกแบบให้แบ่งเป็น 2 ถึงปฏิบัติการ โดยถังใบแรกเป็นขั้นตอนของการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด ถังใบที่สองเป็นถังสร้างมีเทน ระบบเช่นนี้จะช่วยป้องกันสถานะที่อาจเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ เช่น สำหรับน้ำเสียโรงงานมันฝรั่ง ถังสร้างกรดจะถูกออกแบบให้กำจัดซัลเฟตและโปรตีนก่อน แล้วจึงผ่านน้ำเข้าถังสร้างมีเทนต่อไป

Sam-Soon *et al.* (1990) รายงานว่า การหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าถังจะช่วยลดความต้องการความเป็นต่างที่จะต้องเติมแก่ระบบได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับน้ำเสียที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง เพราะถ้าปริมาณความเป็นต่างในน้ำเสียต่อปริมาณซีโอดีมีไม่เพียงพอแล้วอาจเกิดการลดพีเอชในชั้นตะกอนจนต่ำกว่า 6.6 และทำให้ระบบล้มเหลวได้ ในถังปฏิบัติการยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียมีคาร์โบไฮเดรตสูง ที่ส่วนล่างของชั้นตะกอนซึ่งมีความดันย่อยของไฮโดรเจนสูง จะมีการเพิ่มความดันกรดด่างเนื่องจากการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) เป็นอินทรีย์ไนโตรเจนและจากการสะสมกรดไขมันระเหย มีผลทำให้ความเป็นต่างบริเวณนี้ลดลง ที่บริเวณส่วนบนขึ้นไปที่มีความดันย่อยไฮโดรเจนต่ำ กรดไขมันระเหยจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนทำให้ความเป็นกรดลดลงและความเป็นต่างเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาทั้งระบบความเป็นต่างแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เท่ากับการเพิ่มความดันต่างในน้ำเข้ามีหน้าที่เพียงเพื่อควบคุมพีเอชเฉพาะในบริเวณชั้นตะกอนที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงเท่านั้น ดังนั้นการหมุนเวียนน้ำออกที่มีความดันต่างสูงให้กลับเข้าระบบจะช่วยลดความต้องการความเป็นต่างลงได้ส่วนหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาพบว่าที่ Sludge Loading Rate สูงสุด การหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าถังอาจให้ผลเสียต่อระบบได้เพราะเป็นการเพิ่มภาระบรรทุกซีโอดีและกรดไขมันระเหยแก่ชั้นตะกอน

สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีโปรตีนสูง โปรตีน ($\text{NH}/\text{NH}_2/\text{NH}_3^+$ form) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+$ form) ทำให้ความเป็นกรดลดลงและความเป็นต่างเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงไม่ต้องมีการเติมความเป็นต่างให้แก่ระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีโปรตีนสูง

Malina and Pohland (1992) แนะนำการควบคุมการทำงานของระบบยูเอเอสบี ดังนี้

ก. น้ำเสียที่มีโปรตีนสูง มีความเป็นพิษสูง มีศักยภาพที่จะเกิดโฟมลอยหรือตกตะกอนหรือทำให้เกิดตะกอนลอย จะจัดเป็นน้ำเสียประเภทมีความซับซ้อน (Complex Wastewater) จะ

ยับยั้งการทำงานของระบบได้ จึงควรจัดให้ระบบเป็นแบบ 2 ชั้นตอน ได้แก่การมีถังสร้างกรดและถังสร้างมีเทน

ข. ไม่มีความจำเป็นต้องให้เกิดกรดแบบสมบูรณในถังสร้างกรด เพราะจะมีผลเสียต่อถังสร้างมีเทนได้ ตะกอนแบคทีเรียสร้างกรดที่แขวนลอยในน้ำออกจากถังสร้างกรดจะยับยั้งการสร้างเม็ดตะกอนในถังสร้างมีเทนและทำให้เม็ดตะกอนเติบโตช้า ดังนั้นการสร้างกรดในถังสร้างกรดเพียงร้อยละ 20 - 40 และควบคุมให้ Sludge Loading Rate มีค่าต่ำกว่าค่า Methanogen Activity สูงสุดอยู่เสมอก็เพียงพอแล้วที่จะให้ระบบมีเสถียรภาพ

ค. ในบางกรณีที่ต้องการให้มีการสร้างกรดเพียงร้อยละ 10-20 จะแนะนำให้มีการสร้างกรดในถังปรับสภาพ แต่อาจจะต้องมีส่วนตกตะกอนหรืออุปกรณ์ในการแยกตะกอนแบคทีเรียสร้างกรดออกด้วย กรณีนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดีมากกว่า 10,000 มก./ล.

ง. ปกติถังสร้างกรดจะออกแบบให้มีค่าเวลาเก็บกักน้ำ 6 - 24 ชม. ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย อุณหภูมิ ระดับของการสร้างกรดที่ต้องการ และมักจะมีปัญหาในการแยกตะกอน โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีกำลัง (Strength) สูง

จ. น้ำเสียที่สารอินทรีย์ละลายได้สมบูรณ์ สามารถสร้างให้ถังยูเอเอสบีมีความสูงได้ถึง 10 ม. ซึ่งทำให้สามารถประหยัดเนื้อที่ได้มาก น้ำเสียที่สารอินทรีย์ละลายได้บางส่วนถ้ามีกำลังต่ำ เช่น น้ำเสียชุมชน แนะนำให้ใช้ความสูงของถัง 3 - 5 ม. และถ้าน้ำเสียมีกำลังสูง มีค่าซีโอดีมากกว่า 3,000 มก./ล. แนะนำให้ใช้ความสูงของถัง 5 - 7 ม.

ฉ. การหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าระบบมีข้อดี ดังนี้

- ช่วยรักษาความเข้มข้นน้ำเสียไม่ให้เกิน 15,000 มก.ซีโอดี/ล. ได้
- ประหยัดสารเคมีในการรักษาระดับกำลังบัฟเฟอร์ในน้ำเสีย
- ลดความเป็นพิษในน้ำเสียที่จะป้อนแก่ระบบได้
- เพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับเม็ดตะกอน โดยเฉพาะน้ำเสียที่มี

ไขมันหรือลิปิดสูง

ข. ในช่วงการเริ่มต้นระบบ ถ้าน้ำเสียถูกเจือจางให้มีค่าซีโอดีน้อยกว่า 5,000 มก./ล. จะช่วยให้เม็ดตะกอนเจริญเติบโตได้ดี

ข. ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียถ้ามีอยู่สูง จะมีผลยับยั้งต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะถ้าของแข็งแขวนลอยเป็นสารย่อยสลายยาก เพราะจะเกิดการสะสมในชั้นตะกอน ไม่ว่าจะเป็นการกักในทางกล หรือการดูดติดในทางกายภาพก็ตาม และจะยับยั้ง Specific Methanogenic

Activity ของเม็ดตะกอน แต่ถ้าเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่พอ สามารถตกตะกอนได้เร็ว และมีความเร็วไหลขึ้นของน้ำสูงพอ ก็จะทำให้เกิดการแบ่งชั้นของเม็ดตะกอนกับของแข็งแขวนลอยหรือสารย่อยสลายยากที่มาสะสมได้ และการชะล้างจะนำสารเหล่านี้ออกไปจากระบบได้ นอกจากนี้ของแข็งแขวนลอยในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดฝ้าตะกอน และอาจยัดพาเอาเม็ดตะกอนหลุดออกไปจากระบบด้วยกัน ซึ่งในช่วงของการสร้างเม็ดตะกอน ของแข็งแขวนลอยอาจจะขัดขวางการสร้างเม็ดตะกอนโดยจะพาเอาแบคทีเรียที่เริ่มจะรวมกลุ่มกันติดออกไปกับน้ำออกด้วย

2.6 การเกิดเม็ดตะกอน (Granulation) ในระบบยูเอเอสบี

อุปกรณ์แยกก๊าซและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำหรือ GSS (Gas-Solids Separator) ที่ติดตั้งบริเวณด้านบนของถังปฏิกริยายูเอเอสบี จะช่วยป้องกันไม่ให้นิวคลีอัสและก๊าซชีวภาพหลุดออกไปที่ส่วนของการตกตะกอน ทำให้เกิดการสะสมนิวคลีอัสชีวภาพไว้ได้ภายในถังปฏิกริยา นอกจากนี้อุปกรณ์ GSS ยังช่วยนำตะกอนที่เกิดในส่วนตกตะกอนตกกลับลงมาสะสมภายในถังเพิ่มขึ้นอีกด้วย ระบบยูเอเอสบีจึงมีเวลาเก็บกักของแข็ง (Solids Retention Time, SRT) นาน แต่มีเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) สั้น ทำให้สามารถรับภาระบรรทุกลำอินทรีย์ในน้ำเสียได้มากกว่าระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศชนิดอื่น

เมื่อจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาเริ่มปรับตัวได้กับน้ำเสีย จะเกิดการรวมตัวของจุลินทรีย์ เกิดเป็นกลุ่มตะกอนชีวภาพที่สามารถตกตะกอนได้ดีสะสมที่บริเวณชั้นตะกอนล่าง ปรัชญาการรวมตัวนี้เรียกว่าการเกิดเม็ดตะกอนหรือ Microbial Flocculation หรือ Pelletization หรือ Granulation ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดสมดุลย์ของระบบ และเป็นเครื่องชี้เบื้องต้นให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบได้ (Dolfing, 1986) ตะกอนชีวภาพที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ตีรวมทั้งของแข็งแขวนลอยที่เบา จะถูกความเร็วไหลขึ้นของน้ำและก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นชะล้างออกไปกับน้ำออก ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวในการคัดเลือกตะกอนชีวภาพตามธรรมชาติของระบบยูเอเอสบี

การเกิดเม็ดตะกอนอาจเกิดจากการที่จุลินทรีย์เกาะยึดกับวัตถุเฉื่อยและสารเคมีบางชนิดเช่น เม็ดทราย สารประกอบแคลเซียม เหล็ก หรืออาจเกาะยึดติดกันเองโดยแรงทางกายภาพและเคมีก่อน แล้วกลายเป็นนิวเคลียสสำหรับแบคทีเรียอื่นมาเกาะต่อไป แบคทีเรียเส้นใยที่มีโครงสร้างเหมือนตาข่ายอาจทำหน้าที่ยึดเซลล์แบคทีเรียอื่นเข้าไว้ด้วยกัน แล้วน้ำย่อยภายนอกเซลล์ที่ออกมาจากแบคทีเรียจะทำให้เม็ดตะกอนที่เกิดในระยะแรกมีความแน่นมากขึ้น (Yan and Tay, 1997)

การเกิดเม็ดตะกอน ในระบบยูเอเอสบี อาจแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ก. Acclimation การเริ่มก่อตัวเป็นเม็ดตะกอนระยะแรกอย่างช้า ๆ

ข. Granulation เม็ดตะกอนจากขั้นตอนแรกจะเติบโตและขยายขนาดอย่างรวดเร็ว

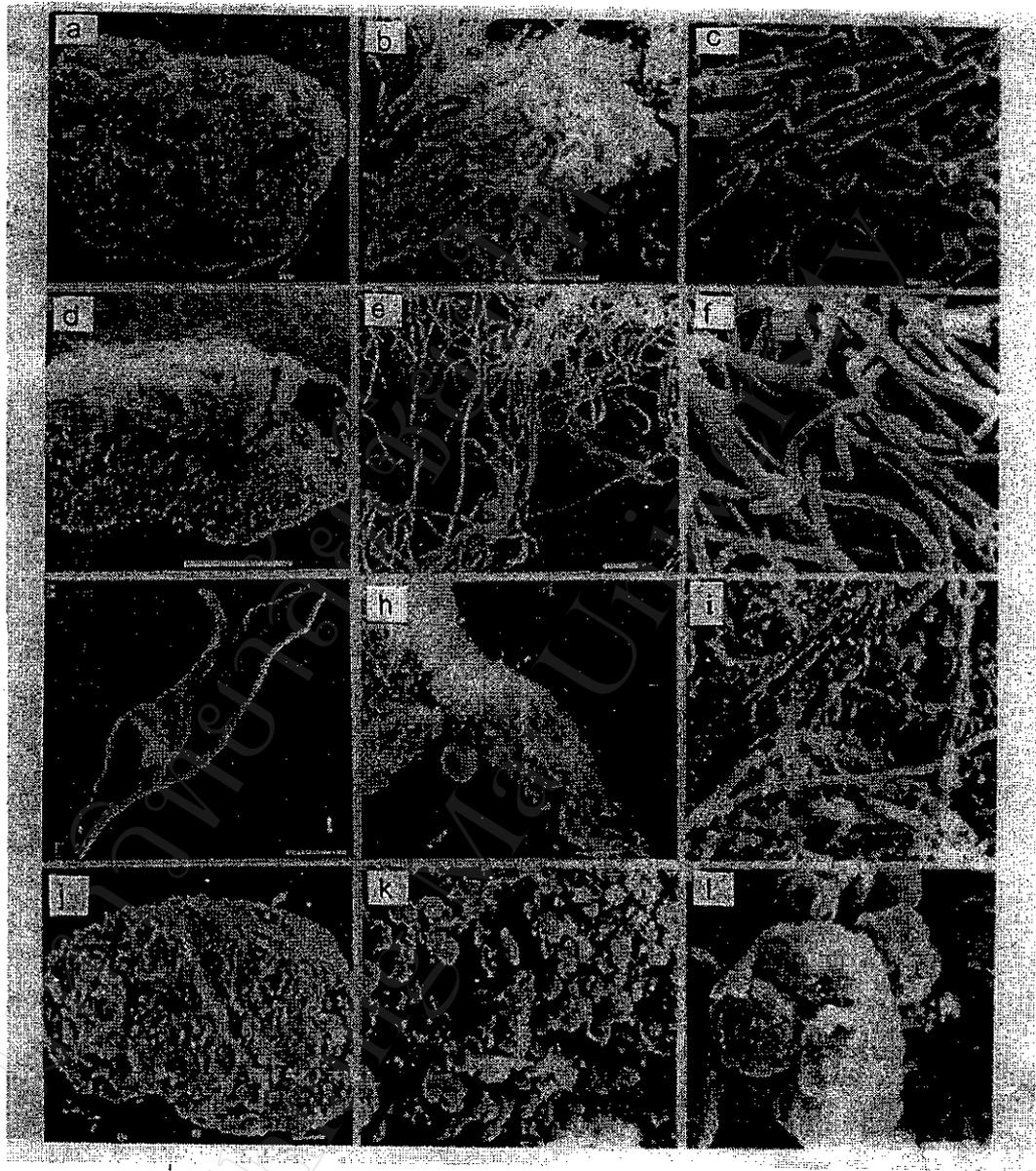
ค. Maturation เกิดเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดคงที่ และเติบโตเต็มที่ ตกตะกอนได้ดี

และเร็ว

Dolfing (1986) รายงานว่า เม็ดตะกอนและเซลล์จุลินทรีย์เดี่ยวมีค่า Buoyant Density เท่ากันคือ 1.00 - 1.025 ก./ซม³ แสดงว่าการตกตะกอนได้ดีและเร็วของเม็ดตะกอน เกิดจากการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นไปตามกฎ Stoke's Law

แม้ว่าในสภาพการทำงานจริงจะต้องการให้เกิดเม็ดตะกอนขึ้นในระบบ แต่การควบคุมและการคาดคะเนถึงการเกิดเม็ดตะกอนก็ทำได้ยากเพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยส่วนใหญ่จะขึ้นกับส่วนประกอบและชนิดของน้ำเสีย ปัจจัยที่มีผลอีกประการหนึ่งคือความเข้มข้นและลักษณะของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย ซึ่งอาจมีผลกลับกันต่อการก่อตัวของเม็ดตะกอน (Oliveira et al., 1997)

เม็ดตะกอนจากระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียต่างชนิดกัน จะมีรูปร่าง ขนาดและชนิดของแบคทีเรียที่เป็นส่วนประกอบต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขและสารอินทรีย์ในน้ำเสียรวมถึงชนิดของหัวเชื้อในการเริ่มต้นระบบ เม็ดตะกอนอาจมีรูปร่างได้หลายแบบดังรูปที่ 2.3 โดยที่ รูป a - c แสดงเม็ดตะกอนที่เกิดในน้ำเสียที่มีอะซิเตทและโพรไพโอเนทที่พีเอช 7.2 รูป d - f แสดงเม็ดตะกอนแบบ Spaghetti - like Pellet ที่เกิดในน้ำเสียที่มีอะซิเตทและโพรไพโอเนทที่พีเอช 7.2 รูป g - i แสดงเม็ดตะกอนแบบ Spikey Granule ที่เกิดในน้ำเสียจากโรงงานแป่งข้าวโพด รูป j - l แสดงเม็ดตะกอนที่มีแบคทีเรีย *Methanosarcina* ประกอบเป็นส่วนใหญ่ที่เกิดในน้ำเสียอะซิเตทและโพรไพโอเนทที่พีเอช 6.0



รูปที่ 2.3 ภาพ Scanning Electron Micrograph ของเม็ดตะกอนแบบต่างๆ
ที่มา : Dolfing, 1986

Dolfing (1986) รายงานว่าในรูปที่ 2.3 รูป a b c จะเรียกว่าเป็นเม็ดตะกอนแบบ Granule ในขณะที่รูป d e f เรียกว่าเม็ดตะกอนแบบ Pellet และพบว่าเม็ดตะกอนแบบ Pellet ก็สามารถให้ประสิทธิภาพของระบบเท่ากับเม็ดตะกอนแบบ Granule แสดงว่าถึงแม้การเกิดเม็ดตะกอนที่ตกตะกอนได้ดีในระบบยูเอเอสบีจะเป็นเครื่องชี้เบื้องต้นให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบ แต่เม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบก็ไม่จำเป็นต้องเป็นชนิด Granule เสมอไป

แบคทีเรียในเม็ดตะกอนจะประกอบขึ้นจากแบคทีเรียชนิดต่างๆ เช่นเดียวกันกับของ Biofilm คือไม่ได้ประกอบขึ้นจากแบคทีเรียเพียงชนิดเดียว ภายในเม็ดตะกอนส่วนใหญ่จะประกอบขึ้นจากแบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรียอะซิโตเจน และแบคทีเรียเมทาโนเจน โดยที่ลักษณะการกระจายของแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในเม็ดตะกอนจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

Novaes (1986) รายงานว่า เม็ดตะกอนที่เกิดในระบบยูเอเอสพีที่บำบัดน้ำเสียชุมชน มีขนาด 4 มม. ที่เวลา 4 เดือน ภายในเม็ดตะกอนพบแบคทีเรียเมทาโนเจนเป็นส่วนใหญ่

Fang (1997) รายงานว่าจากการศึกษาการกระจายชนิดของแบคทีเรียภายในเม็ดตะกอนของระบบยูเอเอสพีที่บำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่จะมีการกระจายของแบคทีเรียชนิดต่างๆภายในเม็ดตะกอน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือชั้นนอกประกอบด้วยแบคทีเรียที่ทำหน้าที่หมักและไฮโดรไลซิส ชั้นกลางประกอบด้วยโคโลนีของแบคทีเรียชนิดต่างๆ อยู่ร่วมกับแบคทีเรียอะซิโตเจน และดำรงชีพพึ่งพาอาหารกันแบบ Syntrophic Colony ชั้นในเป็นแบคทีเรียเมทาโนเจนที่ใช้อะซิเตท และพบว่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียถ้าเกิด Rate -limiting ที่ขั้นของการหมักและไฮโดรไลซิสแล้ว เม็ดตะกอนจะไม่แสดงรูปแบบเป็นชั้นๆ ของแบคทีเรีย แต่จะอยู่คละกันหมดและกระจายอย่างสม่ำเสมอ

ในการศึกษาเม็ดตะกอนที่ย่อยสลายซูโครสของ Fang (1997) พบว่าเม็ดตะกอนมีผิวนอกที่แน่นกว่าชั้นที่อยู่ถัดเข้าไปและมีความหนา 20 - 40 μm กรดอะมิโนกับน้ำตาลที่ถูกไฮโดรไลซิสในชั้นนี้จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรดกลายเป็นกรดไขมันระเหย ซึ่งจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นอะซิเตทและไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียอะซิโตเจนในชั้นกลาง หลังจากนั้นอะซิเตทจะแพร่ผ่านเข้าไปชั้นในและถูกใช้โดยแบคทีเรีย *Methanosaeta* (เดิมเรียก *Methanothrix*) ส่วนไฮโดรเจนจะถูกใช้โดยแบคทีเรียชนิดเมทาโนเจนชนิดที่ใช้ไฮโดรเจน

Pol (1989) อ้างถึงใน Schmidt and Ahring (1997) รายงานว่าแบคทีเรีย *Methanosarcina* และ *Methanosaeta* เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่สำคัญในขณะเริ่มสร้างเม็ดตะกอน โดย *Methanosaeta* เป็นแบคทีเรียเส้นใยเจริญเติบโตด้วยอะซิเตทอย่างเดียว ส่วน *Methanosarcina* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่อาจอยู่ในรูปเซลล์เดี่ยวรูปกลมหรือรวมตัวเป็นกลุ่มใหญ่ขนาด 1 - 3 มม. เจริญเติบโตด้วยอะซิเตท เมทานอล เมทิลแอมโมเนียม และไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์

2.7 น้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมผ้า

น้ำเสียอุตสาหกรรมทอผ้าโดยทั่วไปมีสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียแบ่งได้เป็นสี่กลุ่มใหญ่คือ สารเคลือบเส้นด้าย (Sizes) สารซักฟอก (Detergents) สีย้อม (Dyes) และสารเจือปน (Priority Pollutants) อื่น ซึ่งได้แก่ อะโรมาติก ฮาโลเจน สารไฮโดรคาร์บอน และอาจมีสารโลหะหนักด้วย

Ilangoan and Briones (1997) รายงานว่า น้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอผ้าประกอบด้วยสารละลายอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมซัลไฟเกต ไฮโดรซัลไฟท์ แอมโมเนียมซัลเฟต โซเดียมเปอร์บอเรต และสารอินทรีย์ เช่น กรดออกซาลิก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดไขมัน แป้ง สารซักฟอก สารปรับผ้านุ่ม สีย้อมชนิดต่างๆ และสารช่วยย้อม

น้ำเสียอุตสาหกรรมทอผ้าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการฟอกและย้อมเส้นไหมดิบเพื่อที่จะนำไปทอเป็นผ้าไหมของห้างหุ้นส่วนจำกัด เพ็ญศิริไหมไทย จังหวัดลำพูน

2.7.1 ไหมดิบและการฟอกไหมดิบ

ในกระบวนการผลิตไหมดิบ การดึงเส้นใยออกจากรังไหมรวมกันเป็นหมู่เรียกว่า การสาวไหม (Reeling) เส้นใยที่ได้เรียกว่าไหมดิบ (Raw Silk) ขบวนการผลิตไหมดิบในปัจจุบันมีขั้นตอนดังนี้ (อัคราพร และวาทานาเบ, 2520)

- การฆ่าตัวหนอนไหมและทำรังไหมให้แห้ง เพื่อมิให้คุณภาพรังไหม (Cocoon) เสื่อมขณะขนย้ายหรือจัดเก็บ
- การเลือกและจัดรุ่นไหม เลือกเอารังไหมที่มีตำหนิออก เพื่อให้รังไหมมีขนาดและคุณภาพสม่ำเสมอ
- การต้มไหมในน้ำร้อนหรือไอน้ำ เพื่อให้สามารถดึงเส้นใยออกมาติดต่อกันเป็นเส้นยาวได้
- การสาวไหม โดยดึงเอาเส้นไหมออกจากรังที่ต้มพร้อมกันหลายรังให้ได้ขนาดเส้นด้ายตามต้องการ
- การจัดและตักแต่ง กรอไหมดิบเป็นขีดตามความยาวที่ต้องการ เพื่อให้สะดวกในการขนย้ายและจำหน่าย

ไหมที่เลี้ยงกันตามบ้านเรียกว่าไหมนา กินใบหม่อนเป็นอาหาร ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ เลพิโดปเทรา (Lepidoptera) และบอมบิซิดี (Bombycidae) ไหมอาจแบ่งชนิดเป็นหนึ่งปีออกไข่ฟัก เป็นตัวได้ครั้งเดียวเรียกว่า ยูนิโวลท์ไนท์ (Univoltine) ชนิดที่ออกไข่ฟักเป็นตัวได้ปีละ 2 ครั้ง เรียกว่า ไบโวลท์ไนท์ (Bivoltine) ชนิดที่ออกไข่ฟักเป็นตัวได้ปีละ 3 ครั้ง หรือมากกว่าเรียกว่า มัลติโวลท์ไนท์ (Multivoltine) และยังสามารถแยกชนิดตามแหล่งกำเนิดได้ เช่น ไหมพันธุ์ญี่ปุ่น ไหมจีน ไหมไทย พื้นเมือง ไหมยุโรป เป็นต้น นอกจากนี้อาจแบ่งชนิดตามสีของรังไหม เช่น ไหมพันธุ์รังสีขาว ไหม พันธุ์รังสีเหลือง หรืออาจแบ่งชนิดตามฤดูที่จะเริ่มต้นเลี้ยงก็ได้เช่น ไหมฤดูใบไม้ผลิ และไหมฤดู ใบไม้ร่วง

รูปร่างของรังไหมแบ่งชนิดเป็น ค่อนข้างกลม รูปไข่ ค่อนข้างสี่เหลี่ยมทรงรูปปลายตัด และยาวปลายมน รูปร่างของรังไหมเป็นไปตามพันธุ์ ขนาดของรังไหมขึ้นอยู่กับวิธีเลี้ยงกับเพศของ ตัวหนอน และฤดูที่ออกไข่ รังไหมมีสีต่างๆ เช่น สีขาว เหลือง เขียว สีของรังเป็นส่วนประกอบอัน หนึ่งของสารเซรีซิน (Sericin) ซึ่งเป็นสารโปรตีนธรรมชาติ ลักษณะเป็นขี้ผึ้งหุ้มเส้นใยไหมไว้ ตัวเส้น ใยไหมเป็นโปรตีนธรรมชาติไฟโบรอิน (Fibroin) ซึ่งไม่มี Cystine จึงไม่มีกำมะถันในเส้นใย ทำให้ เส้นใยไหมไม่ทนต่อต่างแก่แตกต่างจากใยขนสัตว์อื่น (อัคราพร ไชละสูต : 2526) และละลายได้ใน โซดาไฟ ใยไหมทนต่อกรดอินทรีย์แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น ดังนั้นการปรับปรุงผ้าไหมเก่าให้ดู เหมือนไหมจึงนิยมแช่ในกรดน้ำส้มและการซักผ้าไหมไม่ควรใช้ผงซักฟอกแต่ควรใช้สบู่อย่างอ่อน

Silk - Glue หรือ Sericin จะเป็นสารเหมือนกาวที่เคลือบเส้นใยไหม ทำให้ใยไหมหยาบ มีความรู้สึกเปราะ ร่วน ซ่อนความมันและสีขาวยของใยไหมเอาไว้ เซรีซินมีปริมาณร้อยละ 25 โดย น้ำหนักของไหมดิบ ละลายในน้ำได้ จะกำจัดออกจากใยไหมอย่างสมบูรณ์ได้โดยการต้ม และจะ กำจัดออกได้เร็วขึ้นในสารละลายสบู่โดยจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของใยไหม ส่วนใยไหมหรือ Fibroin ถึงแม้จะมีส่วนประกอบทางเคมีเป็นโปรตีนเหมือนกับเซรีซิน แต่ใยไหมไม่ละลายในน้ำหรือ ในสารละลายสบู่ ดังนั้นสีของไหมดิบที่เป็นสีของเซรีซินจะหลุดออกไปกับสารละลายสบู่คงเหลือใย ไหมที่สะอาดสามารถ นำมาย้อมสีได้ดี

การ Scouring ไหมดิบหรือการกำจัดเซรีซินออกจากใยไหมนี้ เรียกว่า Boiling - off หรือ Degumming หรือ Stripping น้ำหนักไหมจะหายไปร้อยละ 22 - 28 ไหมที่ผ่านกระบวนการนี้จะ เรียกว่า Boiled - Off Silk หรือ Cuit Silk ในกรณีนี้เซรีซินไม่ได้ถูกกำจัดออกอย่างสมบูรณ์ แต่กำจัด

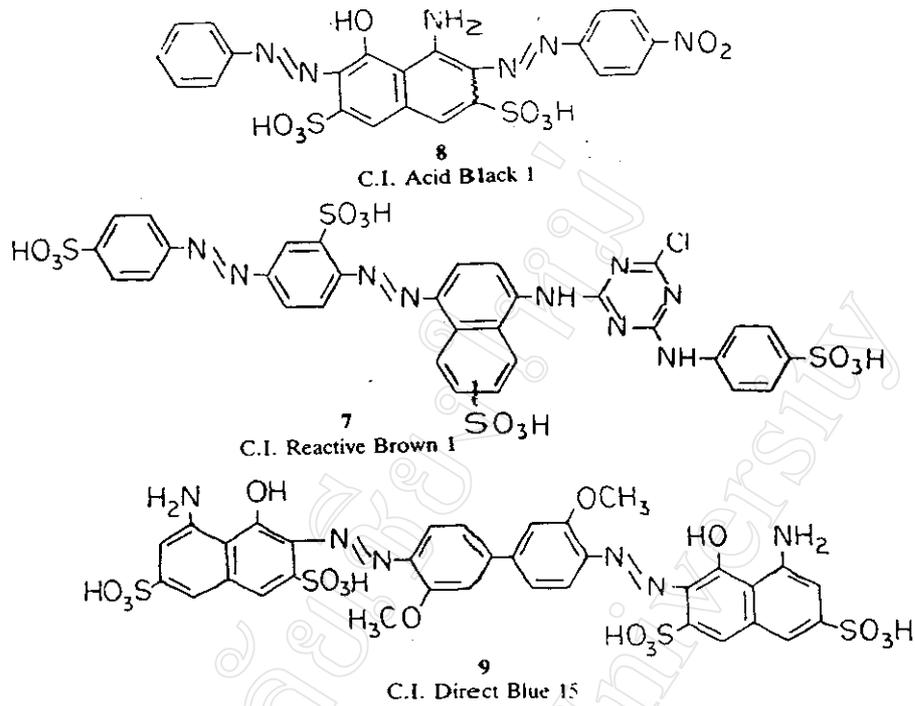
เซริซินออกเพียงเพื่อให้ไหมนุ่ม และทำงานได้ในโรงย้อมสี การ Scouring นี้จะเรียกว่า Soupling น้ำหนักไหมจะหายไปร้อยละ 10 - 15 ไหมที่ผ่านขบวนการนี้เรียกว่า Soupled Silk หรือ Miscuit Silk

และในกรณีต้องการกำจัดเซริซินเพียงเล็กน้อย เพื่อเหลือเซริซินไว้ทำหน้าที่เป็น Sizing เคลือบเส้นใยเพื่อความสะดวกในการพันไหมเป็นเชด ไหมชนิดนี้เรียก Ecrú Silk น้ำหนักไหมจะหายไปร้อยละ 2 - 5 ทำโดยซักในน้ำอุณหภูมิที่ไม่สูง การ Boiling - Off ที่สมบูรณ์ จะใช้สบู่ 4 ออนซ์ถึง 1 ปอนด์ ต่อแกลลอน ต้มนาน 1 - 2 ชั่วโมง แล้วต้มซ้ำด้วยน้ำสบู่ใหม่ อาจต้องเติมโซดาแอชเพื่อปรับสภาพน้ำถ้าใช้ที่เป็นน้ำอ่อน น้ำที่ Scouring แล้วเรียกว่า Boiled - Off Liquor สามารถนำไปต้มเล็กน้อยในถังย้อมสี เพื่อช่วยให้ไหมที่ย้อมอ่อนตัวลงและช่วยกระจายสีย้อมให้สม่ำเสมอ

2.7.2 สีย้อม (Dyes)

ในอดีต สีย้อมผ้าส่วนใหญ่ยังเป็นสีที่ได้มาตามธรรมชาติจากพืช หอย แมลง เนื้อไม้ และเกลือของโลหะบางชนิด เช่น ครั่งตัวเมียจะให้สีม่วงแดงใช้ย้อมไหมและขนสัตว์ แก่นของต้นลือควูดและผลมะเกลือให้สีดำใช้ย้อมผ้าไหมแท้และผ้าฝ้าย เนื้อไม้ไอคิให้สีเหลือง ต้นอินดิโกให้สีคราม รากของต้นเข็มให้สีแดง ตะกั่วโครเมทให้สีเหลือง และเฟอร์โรไซยาไนด์ให้สีน้ำเงิน

สีย้อมสังเคราะห์ในปัจจุบันเป็นสารเคมีสกัดจากน้ำมันถ่านหิน มีโครงสร้างสีต่างกันในการค้ามากกว่า 7,000 ชนิดที่บันทึกใน CI (Color Index) สีของสีย้อมที่ตามนุษย์มองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุลของสีย้อม 2 ส่วนคือ กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ (Chromophores) ที่ก่อให้เกิดสีเช่น กลุ่ม Nitroso (-NO-) กลุ่ม Azo (-N=N-) กลุ่ม Carbonyl - Nitrogen (-CH=N-) เป็นต้น กับกลุ่มอะตอมออกโซโครม (Auxochromes) ที่ทำปฏิกิริยาให้สีย้อมยึดเกาะกับเส้นใยผ้าได้หรือเรียกว่า Dye Functional Group เช่น -OH, -COOH, -SO₃H เป็นต้น รูปที่ 2.4 เป็นรูปแสดงการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมแบบต่างๆในโมเลกุลของสีย้อมบางชนิด



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างสีย้อมอะโซบางชนิดที่ใช้ทั่วไป

ที่มา : Waring and Hallas, 1990

คุณภาพของสีย้อมในการทำงานจะขึ้นกับความสามารถในการดูดติดของสีกับเส้นใยมากกว่าความสามารถในการรวมตัวกับน้ำ แรงดูดติดของสีย้อมขึ้นกับอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด คือ

- ก. พันธะเคมีไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
- ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van De Waals Forces)
- ค. แรงไอออนิก (Ionic Forces)
- ง. พันธะเคมีโควาเลนต์ (Covalent Bond)

การยึดติดจำเป็นต้องใช้อิทธิพลเชิงเคมีเหล่านี้อย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป จึงจะทำให้สีย้อมยึดติดกับเส้นใยได้ สีย้อมสามารถแบ่งตามลักษณะการละลายน้ำได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดละลายน้ำได้ดีเรียกว่าสีย้อม (Dyes) และชนิดที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่าสีปักเมนต์ (Pigments) สีปักเมนต์ติดเส้นใยด้วยตัวเองไม่ได้ต้องใช้สารช่วยติดประเภทเรซิน (Resin) ช่วย

นอกจากนี้สีย้อมยังสามารถแบ่งชนิดตามลักษณะการนำไปใช้งานได้แก่

สีเบสิก (Basic Dyes) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) ละลายน้ำได้ ย้อมติดใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (Chromophores) ให้แคทไอออน บางครั้งเรียกว่าสีแคทไอออน ถ้าย้อมใยเซลลูโลสใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็น สารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมใยระหว่างตัวสีกับ เส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่าสารช่วยติด (Mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใสแต่ไม่ทนแสง

สีแอซิด (Acid Dyes) คือสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ติดใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมซึ่งเป็นกรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสซึ่ง มิใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ด้วย เช่น ปอ ป่าน และใยโพลีเอไมด์ เป็นต้น

สีมอแดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and Premetallized Dyes) สีแอซิดหลาย ตัวสามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม ละอองสีที่ก่อรูปบน หรือในเส้นใยภายหลังเมื่อย้อมทับด้วยเกลือโลหะแล้วจะมีความคงทนต่อขบวนการใช้น้ำ (Wet Fastness) ได้ดีกว่าที่ไม่ย้อมทับ สารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ สามารถย้อมตัว สีก่อน พร้อมกับหรือภายหลังการย้อมด้วยเกลือโลหะได้ทุกวิธี การพัฒนาตัวสีทำงานของตัวเองกันนี้ อาจทำได้กับสีไดเรกต์ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่าโครงสร้างของเส้นใยสามารถจะรวมตัวกับไอออนของ โลหะก่อรูปเป็นสารประกอบภายใน ทำให้ความคงทนของสีดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้ยังคงเรียกว่าสีไดเรกต์ ส่วนที่จะเรียกว่า สีมอแดนท์ นั้น จะต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะใยโปรตีน สีเบสิกเมื่อใช้ย้อมใย เซลลูโลสต้องใช้สารช่วยติด สีเบสิกอาจเรียกว่าสีมอแดนท์ได้เหมือนกันแต่ไม่มีผู้นิยมเรียก เพราะ ขบวนการย้อมแตกต่างกัน

สีไดเรกต์ (Direct) บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้าย ได้ชื่อมาจากความจริงที่ว่าสีชนิดนี้ เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ติดใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะไซ มี น้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิค ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ สีในกลุ่มนี้มีวรรณะ (Hue) คุณสมบัติการย้อม ความคงทน ตลอดจนราคาแตกต่างกันมากถ้าเป็นสีซึ่งมีความคงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิตจะสูงขึ้น ราคาจำหน่ายต้องสูงขึ้นเป็นเงาตามตัว นิยมใช้ย้อมใยเซลลูโลสซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อขบวนการใช้น้ำมากนัก

สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) สีย้อมนี้ใช้ย้อมใยอาซิเตท ซึ่งเป็นใยที่ดูดน้ำได้น้อย สีตัวนี้ไม่ละลายน้ำ แต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing Agent) ที่เหมาะสม ใช้ย้อมในน้ำธรรมดาไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วยอีก นอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

สีอะโซอิค (Azoic Dyes) สีในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบอะโซเหมือนกัน แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (Diazonium Salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่าคัปปลิง (Coupling) สีในกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมใยเซลลูโลสเท่านั้นเพราะสารประกอบฟีนอลละลายในด่างซึ่งเป็นอันตรายต่อใยโปรตีน ฟีนอลละลายน้ำและติดใยเซลลูโลสดี ส่วนเกลือไดอะโซเนียมนั้นไม่ละลายน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารทั้งสองชนิดนี้ทำให้ใยเซลลูโลสซึ่งถูกย้อมย้อมสีชนิดนี้มีความคงทนทุกประการ สีชนิดนี้เป็นตัวสีสำคัญสำหรับย้อมเซลลูโลส

สีวัต (Wat Dyes) สีวัตได้ชื่อมาจากตัวสีเองไม่ละลายในน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลายจึงจะติดใยเซลลูโลสได้ ขบวนการย้อมสีคราม (Indigo) ที่สกัดมาจากต้นครามนั้นเป็นที่รู้จักกันมานานนับ 1000 ปี ในน้ำย้อมครามจะมีด่างเป็นตัวทำละลายสีครามซึ่งตามปกติไม่มีสีเรียกว่าสารประกอบลิวโค การทำงานกับน้ำนี้ไว้นับถึงขนาดใหญ่ ภาษาอังกฤษเรียกว่า Wat ซึ่งกลายเป็นชื่อของตัวสีในกลุ่มนี้ การละลายสารประกอบลิวโคของสีครามสังเคราะห์ด้วยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมเรียกว่า Watting ปัจจุบันสีวัตเป็นสีสังเคราะห์ที่ไม่ละลายน้ำกลุ่มใหญ่ สีในกลุ่มนี้เกิดมาจากสารประกอบอินดิโกหรือ Anthraquinone

สีกำมะถัน (Sulphur or Sulphide Dyes) สีกำมะถันเตรียมได้โดยหลอมละลายกำมะถัน ไฮเดียมซัลไฟด์ กรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรอื่นๆ ซึ่งเป็น Cyclic Hydrocarbon เช่น เบนซีนหรือแนปทาซีน โครงสร้างของสีพวกนี้ส่วนใหญ่ยังไม่ทราบแน่ชัด จะติดใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีสภาพเป็นด่าง สารรีดิวซ์ที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดคือ ไฮเดียมซัลไฟด์ สีกำมะถันไม่สโตไลยกเว้นบางตัว ไม่ละลายในน้ำ ปัจจุบันมีผู้ผลิตสีซึ่งได้รีดิวซ์แล้วออกจำหน่ายละลายในน้ำได้ดี เช่น Inmedial Leuco และ Thionol M ของบริษัท ไอ.ซี.ไอ. ตัวสีเหล่านี้ละลายน้ำได้เช่นเดียวกับสีไดเรกต์ แต่ในน้ำย้อมต้องใส่ไฮเดียมซัลไฟด์ด้วย

สีออกซิไดส์ (Oxidation Colorants) สี Aniline Black เป็นตัวอย่างที่ดีของสีในกลุ่มนี้ เมื่อออกซิไดส์ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมจะเกิดเป็นสีเกลืออะนิลีน ไมติดยาเซลลูโลส โครงสร้างที่ให้สี หรือวิธีที่สารยึดติดกับใยเซลลูโลสนั้น ยังไม่เป็นที่ทราบกันแต่เป็นตัวอย่างที่มีความคงทน

สีโอนเนียม (Onium Dyes) คือสีปิกเมนต์ที่ละลายน้ำได้ โดยคัดเลือกตัวปิกเมนต์ที่มีความคงทนต่อสารเคมีและแสงนำมาปรับปรุงให้มีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ กลวิธีการย้อมจะดำเนินการแบบเดียวกับสีวัตที่ละลายน้ำได้ โดยให้สีดูดซึมเข้าไปในผ้าแล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นตัวอย่างที่ไม่ละลายน้ำอีกครั้ง ชื่อของตัวอย่างสีได้มาจากกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าการย้อม

สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) สีรีแอคทีฟละลายน้ำได้ เป็นสีย้อมใยเซลลูโลสที่ดีที่สุด มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดย Covalent Bond กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวอย่างสีทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวอย่างสีจะยึดติดเส้นใย ตัวอย่างที่ดีคือสี Procion, Cibacron และ Remazol

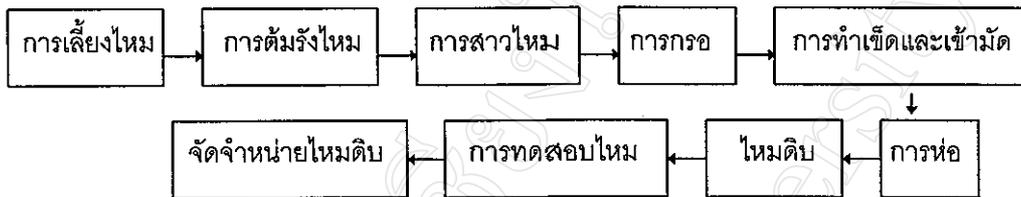
สีโลหะ (Mineral Colorants) สารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้ย้อมใยเซลลูโลสและให้สีต่าง ๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ตกตะกอนภายในเส้นใย ตัวอย่างที่ดีได้แก่ Mineral khaki ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์รวมกัน

ระบบการย้อมสีปิกเมนต์ด้วยเรซิน (Pigment-resin Binder System) กระบวนการย้อมแบบนี้ใช้กับเส้นใยได้ทุกชนิด เหมาะสำหรับย้อมผ้าทั้งผืนเท่านั้น มีลักษณะคล้ายกับการพิมพ์หรือการเขียนสี โดยอัดผ้าด้วยสีปิกเมนต์ผสมเรซิน ให้เรซินเคลือบติดผิวผ้าเป็นแผ่นบางๆ อบให้แห้ง แล้วนำไปอบด้วยความร้อนสูงให้เรซินรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ ใช้ย้อมผ้าตัดเสื้อและผ้าตกแต่งเครื่องเรือน ความคงทนต่อการขัดสีดีมาก แต่เรซินมักจะทำให้ผิวสัมผัสของผ้าแข็งกระด้าง

สีย้อมที่เรียกว่าสีไม่ตก (Fast Color) นอกจากจะเป็นคุณสมบัติโดยตรงของสีย้อมแล้ว สิ่งแวดล้อมและวิธีใช้ยังเป็นสาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่จะทำให้สีตกหรือไม่ นอกจากนี้ ผ้าที่ใช้ในชีวิตประจำวันควรมีความทนทานต่อแสงแดด ความชื้น เหงื่อ และการซักด้วย

2.7.3 น้ำเสียฟอกและย้อมไหมที่ใช้ในการศึกษา

ขั้นตอนในการผลิตผ้าไหมโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการผลิตใยไหมดิบดังแสดงในรูปที่ 2.5 และขั้นตอนการนำใยไหมไปผลิตเป็นผ้าไหมไทยดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การเตรียมเส้นไหมดิบ

ที่มา : อัจฉราพร และวาทานาเบ, 2520



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการนำไหมดิบมาผลิตเป็นผ้าไหม

ที่มา : อัจฉราพร และวาทานาเบ, 2520

รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเกิดน้ำเสียจากการฟอกทำความสะอาดเส้นไหมดิบและการย้อมสีเส้นไหมของห้างหุ้นส่วนจำกัดเพ็ญศิริไหมไทยที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ การฟอกไหมและการย้อมไหมของโรงงานนี้เป็นการทำงานแบบเทเข้าถ่ายออก (Batch) ในถังสแตนเลสขนาด 120 ลิตร มีปริมาณน้ำเสียสูงสุดประมาณ 300ลิตร/วัน สามารถทำการฟอกย้อมไหมได้ปริมาณไหมสูงสุดประมาณ 80 กก./วัน การบำบัดน้ำเสียของโรงงานในปัจจุบันเป็นระบบถังเกรอะ

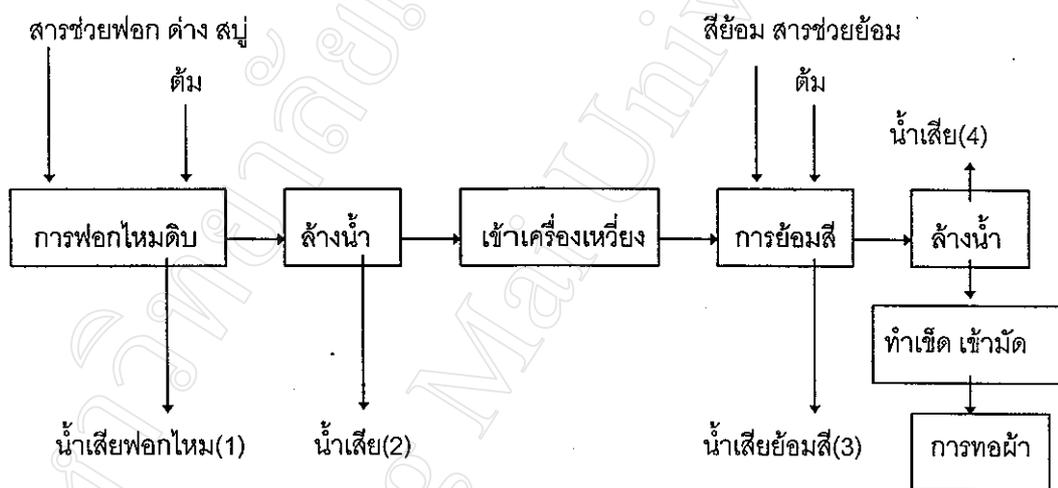
ตามรูปที่ 2.7 ขั้นตอนต่างๆ ของการฟอกและย้อมไหมเกิดน้ำเสียในปริมาณต่างกันดัง

นี้

- ขั้นตอนฟอกไหม(1) เกิดน้ำเสียร้อยละ 35

- ขั้นตอนการล้างไหมหลังการฟอกด้วยน้ำเย็น(2) เกิดน้ำเสียร้อยละ 15
- ขั้นตอนย้อมสีไหม(3) เกิดน้ำเสียร้อยละ 35
- ขั้นตอนการล้างไหมหลังการย้อมด้วยน้ำเย็น(4) เกิดน้ำเสียร้อยละ 15

น้ำเสียที่นำมาทำการศึกษาจะทำการเก็บโดยตรงจากถังฟอกในขั้นตอน (1) และจากถังย้อมในขั้นตอน (3) ด้วยวิธีการลักน้ำจากถังในสัดส่วนเท่ากัน แยกเก็บไว้ในถังขนาด 20 ลิตรแล้วนำมาเก็บรักษาที่ห้องอุณหภูมิต่ำ 4° ซ ณ สถานที่ทำการทดลอง



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการฟอกและย้อมสีเส้นไหมของหจก.เพ็ญศิริไหมไทย

โรงงานฟอกย้อมไหมของหจก.เพ็ญศิริไหมไทยทำการฟอกและย้อมสีเส้นไหมดิบในปริมาณไหมและชนิดไหมสีขึ้นกับปริมาณไหมที่ต้องใช้ในการทอผ้าลวดลายต่างๆ ตามที่ฝ่ายทอผ้าไหมต้องการ หลังจากการย้อมไหมแล้ว จะส่งไหมให้หน่วยทอผ้าด้วยมือซึ่งเป็นชาวบ้านที่กระจายอยู่ในหมู่บ้านใกล้เคียงเพื่อทำการทอผ้าไหมที่เรียกว่าผ้าไหมยกในลวดลายต่างๆ พันธุ์ของไหมดิบที่ทำการส่งมาเพื่อนำมาฟอกและย้อมส่วนใหญ่จะมีสองชนิดคือไหมดิบพันธุ์พื้นเมืองซึ่งมีสารเซริซินเคลือบเส้นไหมหนาและมีสีเหลืองทำการฟอกให้ขาวได้ยาก และไหมดิบพันธุ์ผสมซึ่งมีสีขาวสามารถฟอกให้ขาวได้ง่าย

การฟอกไหมเพื่อกำจัดเชริซินของหจก.เพ็ญศิริไหมไทยมีดังนี้

การฟอกครั้งที่หนึ่ง

การฟอกไหมดิบจะทำในถังสแตนเลส 120 ล. ซึ่งสามารถฟอกไหมดิบได้ครั้งละ 20 กก. จะมีการเติมสารต่างๆ ดังนี้

- สารช่วยฟอก LAVENOL MR (ของบริษัท BAYER) ในรูปของสบู่เหลว 5 กรัม/ล.
- สารปรับความกระด้างของน้ำใช้ไตรโซเดียมฟอสเฟต หรือ CALGON - T 3 กรัม/ล.
- ด่างโซเดียมคาร์บอเนต 2 กรัม/ล.
- สบู่ลายหรือสบู่ไขมัน 2 กรัม/ล.

ทำการต้ม 60 นาทีที่อุณหภูมิ 95 °ซ แล้วล้างด้วยน้ำเย็นเสร็จแล้วนำเส้นไหมเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำให้ไหมแห้ง

การฟอกครั้งที่สอง

การฟอกครั้งที่สองจำเป็นต้องมีเฉพาะในกรณีต้องการฟอกให้สะอาดมากขึ้นเพื่อให้สีย้อมยึดติดเส้นไหมได้สมบูรณ์ หรือไหมที่จะย้อมสีเป็นชนิดไหมพื้นเมือง ซึ่งเส้นไหมจะมีสารเชริซินหุ้มอยู่มาก สารเรซินของไหมพันธุ์พื้นเมืองนี้จะทำให้ไหมมีสีเหลือง และขัดขวางการยึดติดของสีย้อม การฟอกครั้งที่สองจะใช้สารเหมือนข้อ ก. แต่ทำการต้มเพียง 30 นาทีที่อุณหภูมิ 95 °ซ และอาจเติมสารฟอกขาวด้วยถ้าจำเป็น

การย้อมไหมของหจก.เพ็ญศิริไหมไทย จะมีการใช้สีย้อมสามชนิดคือสีย้อมแอซิด สีย้อมรีแอกทีฟ และสีย้อมไดเรกต์ การย้อมสีประมาณร้อยละ 70 จะเป็นการย้อมด้วยสีย้อมแอซิด เพราะมีความง่ายในการทำงาน มีการย้อมด้วยสีย้อมชนิดสีรีแอกทีฟและสีไดเรกต์เป็นส่วนน้อย นอกจากนี้การเลือกชนิดของสีย้อมยังขึ้นกับโทนของสีที่ต้องการจะย้อมอีกด้วย กรรมวิธีการย้อมสีแบ่งตามชนิดของสีย้อมดังนี้

ก. สีแอซิด

สีย้อมชนิดนี้มีชื่อทางการค้าได้แก่ TELON, SUPRACEN, SUPRANOL, SUPRAMIN, ISOLAN ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ต้องการ หลังจากเติมสีย้อมลงในถังย้อมสแตนเลสขนาด 120 ล.แล้ว จะทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาทีแล้วจึงต้มที่อุณหภูมิ 95-98 °ซ เป็นเวลา 45-90 นาที สารช่วยย้อมที่เติมมีดังนี้

- กรดน้ำส้ม เติมน้ำมีพีเอช 4-5

- สารช่วยย้อม LYOGEN SMK

ในกรณีที่ต้องการย้อมสีที่มีโทนของสีค่อนข้างอ่อน จะต้องป้องกันการเกิดสีต่างจากการย้อมไม่สม่ำเสมอโดยแช่ไหมในสารละลายของ AVOLAN-75 ซึ่งเป็นสาร Levelling Agent ในปริมาณ 1 กรัม/ล.และกรดน้ำส้มเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการย้อม

ข. สีรีแอกทีฟ

สีย้อมชนิดนี้มีชื่อในทางการค้าคือ LEVAFIX E, EA และ EN ไม่นิยมใช้ย้อมเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการย้อม แต่สีมีความทนทานต่อการซักดี หลังจากเติมสีย้อมและเกลือแกงหรือเกลือโซเดียมซัลเฟตในน้ำอุณหภูมิ 50°C แล้วจะทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เติมด่างโซเดียมคาร์บอเนตแล้วทิ้งไว้ประมาณ 60 นาที เสร็จแล้วนำไปล้างด้วยน้ำสบู่ร้อนที่มีสารช่วยการย้อมติดเป็นเวลา 10-15 นาที การใส่เกลือและด่างจะต้องไม่ใส่ในครั้งเดียวเพราะจะทำให้สีไม่สม่ำเสมอ แต่จะใส่เป็นช่วงๆ ห่างกัน 5-10 นาที ปริมาณของเกลือและด่างขึ้นอยู่กับความเข้มของสีที่ต้องการดังนี้

	สี ≤ 0.5 %	≥ 0.5 %	
เกลือ	20 - 30	40 - 60	กรัม/ล.
ด่าง	2 - 3	4 - 6	กรัม/ล.

ค. สีไดเรกต์

สีย้อมชนิดนี้มีชื่อทางการค้าคือ SIRIUS, SUPRA การย้อมทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากแต่ไม่นิยมใช้เพราะสีไม่ทนต่อการซัก ในการย้อมสีชนิดนี้สีและกรดน้ำส้มจะถูกเติมลงในถังอุณหภูมิห้องที่พีเอช 5 ทิ้งไว้ 5-10 นาทีแล้วต้มที่อุณหภูมิ 95-98 °C เป็นเวลา 45-60 นาที

2.8. สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมทอผ้าด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี

เนื่องจากสีย้อมได้รับการพัฒนาและวิจัยอย่างต่อเนื่องให้มีความคงทนต่อสภาพการใช้งานไม่ให้ซีด หลุดลอก หรือสลายตัวได้ง่าย ดังนั้นสีย้อมที่เหลือจากการย้อมในน้ำเสียจึงย่อยสลายได้ยากในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ และไม่สามารถทำให้หายไปหรือทำให้สีลดลงได้โดยการเจือจางในแหล่งน้ำ จึงอาจก่อให้เกิดสภาพน้ำรังเกียจได้ กระบวนการทางกายภาพและเคมี เช่น

กระบวนการฟลอคคูเลชัน - โคแอกคูเลชัน การดูดติดผิวโดยผงถ่านกัมมันต์ การใช้เมมเบรน การออกซิเดชันด้วยโอโซน การใช้ไฟฟ้าแยกสีกออกจากน้ำ แม้จะให้ผลดีในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ แต่ก็ยังมีปัญหาด้านค่าใช้จ่ายในการจัดหาสารเคมีและการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งในบางประเทศจะถือว่าตะกอนประเภทนี้เป็นตะกอนสารพิษที่ต้องได้รับการจัดการเป็นพิเศษ นอกจากนี้กระบวนการตกตะกอนธรรมดายังไม่สามารถกำจัดสีที่ฟีนอลิกในน้ำเสียได้ เพราะสีที่ฟีนอลิกมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี

Kennedy *et al.* (1992) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า Lexington Fabrics Inc. มลรัฐอลาบามา ซึ่งมีความเข้มข้นบีโอดี 300 - 350 มก./ล. ค่าพีเอช 6 - 10.6 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด 60 - 500 มก./ล. ด้วยวิธีการทางกายภาพและเคมีวิธีต่าง ๆ ให้ผลดังนี้

ก. การโคแอกคูเลชันด้วยสารส้ม พบว่าต้องปรับพีเอชให้สูงถึง 11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะยิ่งสูงถ้าใช้สารส้มในปริมาณที่มากพอ หลังกระบวนการบำบัดต้องมีการปรับให้เป็นกลางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการบำบัดพบว่าสียังคงถูกสังเกตเห็นได้และไม่ผ่านเกณฑ์การวัดความเข้มสีของ ADEM (ALABAMA Department of Environmental Management)

ข. การโคแอกคูเลชันด้วยเฟอริคคลอไรด์ พบว่าถึงแม้จะใช้วิธีนี้มากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงย้อมส่วนใหญ่ การตกตะกอนให้ผลดีแต่ประสิทธิภาพการลดสีมีเพียงร้อยละ 45-85 แม้จะกระทำที่ค่าพีเอชสูงและเติมเฟอริคคลอไรด์สูงถึง 1,000 มก./ล. พบว่าการใช้เฟอริคคลอไรด์ในปริมาณถึง 200 มก./ล. ไม่ให้ผลการลดสีเป็นที่น่าพอใจ

ค. การโคแอกคูเลชันด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์และปูนขาว พบว่าต้องปรับพีเอชที่ 11 และเมื่อใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ 200 - 1,000 มก./ล. กับปูนขาว 400 มก./ล. จะกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 88 วิธีนี้ต้องการมีขั้นตอนถึงกวนเร็วของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ถึงกวนเร็วปูนขาว ระบบตกตะกอน ระบบกรอง ระบบปรับพีเอชให้เป็นกลาง และกระบวนการกำจัดตะกอนที่เกิด

ง. การใช้กระบวนการแบบ Electrolytic Precipitation พบว่าแท่งอะโนดที่ทำจากแมกนีเซียมให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ร้อยละ 88 สูงกว่าแท่งอะโนดที่ทำจากเหล็กและอลูมิเนียมตามลำดับ แต่ต้องการระบบตกตะกอน ระบบกรอง ระบบปรับพีเอช การกำจัดตะกอนที่เกิด รวมถึงการจัดหากระแสไฟฟ้าและวัสดุแท่งอะโนด

๑. การโคแอกูเลชันด้วยโพลีเมอร์ พบว่าโพลีเมอร์ K2002 ในปริมาณ 2 กรัม/ล.น้ำเสีย และสารช่วยเกิดฟล็อก 611BC ในปริมาณ 0.48 กรัม/ล.น้ำเสีย ของบริษัท Stockhausen Inc. ซึ่งนับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก ให้ประสิทธิภาพการลดสีได้มากกว่าร้อยละ 80 โดยไม่ต้องปรับพีเอช

ผลของการศึกษาแนะนำให้ย้ายโรงงานไปที่เมืองฟลอเรนซ์ มลรัฐจอร์เจียมา เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางของเมืองทำการบำบัดแทน โดยจะใช้น้ำเสียชุมชนมาทำการเจือจาง ซึ่งบริษัทจะมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการจัดหาสารเคมีที่ใช้ในระบบต่างๆ เอง และรวมถึงการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้น

2.8.2 การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมทอผ้าด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ถึงแม้สารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมทอผ้าจะสามารถถูกกำจัดได้ดีด้วยวิธีทางชีวภาพแบบเติมอากาศ แต่สีย้อมในน้ำเสียกลับมีความทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์โดยจุลชีพชนิดใช้อากาศ ดังนั้นจึงไม่สามารถลดสีได้โดยเฉพาะสีย้อมอะโซ ซึ่งแสดงลักษณะโดยกลุ่มของอะโซ (-N=N-) 1 กลุ่มหรือมากกว่า ร่วมกับ 1 กลุ่มของอะโรมาติกหรือมากกว่าในโมเลกุลของสีย้อม โดยปกติจะพบกลุ่มของอะโซร้อยละ 60-70 ของอุตสาหกรรมสีย้อม การที่มีการใช้สีอะโซมาก ทำให้สีอะโซมีศักยภาพในการเป็นปัญหาต่อสภาพแวดล้อมเพราะมีความเสถียรจากการย่อยสลายของแสงแดดและแบคทีเรียในสภาพธรรมชาติ นอกจากนี้สารอะโรมาติกแอมีนซึ่งเป็นสาร Intermediates จากการรีดักชันของ Azo Linkage ภายใต้สภาพไร้อากาศ ยังมีความเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็งด้วย (Setiadi and Loosdrocht, 1997)

Terzis and Yuan (1997) รายงานว่าสารอะโรมาติกที่เป็น Intermediates ที่เกิดจากการสลายพันธะของอะโซกรุป ถ้ามีการสะสมมากในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ จะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพได้

Razo - Flores *et al.* (1997) รายงานว่า สารอะโรมาติกแอมีนที่ได้จากการรีดักชัน Azo Linkage ของแบคทีเรียชนิดไร้อากาศจะไม่ถูกเมตาโบลิซึมต่อไปในสภาพไร้ออกซิเจน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการหลังการบำบัดด้วยกระบวนการชีวภาพแบบใช้อากาศเพื่อให้สามารถกำจัดสีย้อมอะโซให้ได้หมด (Mineralization)

Bhattacharya *et al.* (1990) ศึกษาการลดสี Acid Orange 10 ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดโมโนอะโซโดยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ตามด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศในระดับ Bench Scale

พบว่าระบบบำบัดไร้อากาศสามารถลดสีย้อม Acid Orange 10 ที่ความเข้มข้น 8 - 25 มก./ล. ได้ร้อยละ 30 - 50 และระบบบำบัดแบบเติมอากาศสามารถลดลงได้อีกร้อยละ 1 - 8

โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ (2540) ศึกษาการลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียด้วยระบบยูเอเอสบี 2 ชั้นตอน มีเวลาเก็บกักน้ำในขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทนชั้นตอนละ 12 ชั่วโมง การศึกษาแบ่งเป็น 5 การทดลอง โดย 3 การทดลองแรกใช้น้ำเสียสีเข้ม 3 โทเนล คือ สีดำ สีแดง สีน้ำเงินจากการย้อมมาเจือจางให้มีความเข้มข้น 150 หน่วยเอสยู ทำการศึกษากับความเข้มข้นแ่งมันที่เติมแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 500 1,000 และ 1,500 มก./ล. การทดลองที่ 4 คล้ายกับสามการทดลองแรกแต่เป็นสีน้ำเงินสังเคราะห์ทั้งหมด การทดลองที่ 5 ใช้น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเป็น 0 50 และ 100 หน่วยเอสยู และเติมความเข้มข้นแ่งมัน 500 มก./ล. พบว่าการเติมแ่งมันทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติม การเติมแ่งมันในช่วง 500 ถึง 1,500 มก./ล. ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการลดสีเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ที่ความเข้มข้นแ่งมัน 0 200 และ 500 มก./ล. ประสิทธิภาพการลดสีของน้ำย้อมสีแดงเท่ากับร้อยละ 36 57 และ 56 ตามลำดับ น้ำย้อมสีน้ำเงินมีประสิทธิภาพการลดสีร้อยละ 48 52 56 ตามลำดับ น้ำย้อมสีน้ำเงินสังเคราะห์มีประสิทธิภาพการลดสีร้อยละ 36 54 57 ตามลำดับ แสดงว่าระบบยูเอเอสบีสามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียได้ กลไกการลดสีคาดว่าเกิดจากสีย้อมอะโซที่ทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนในกระบวนการย่อยอาหารของแบคทีเรีย และพบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีบทบาทในการลดสีน้อยกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด

Razo-Flores *et al.* (1997) ทำการศึกษาการลดของสีย้อมอะโซ 2 ชนิด คือสี Mordant Orange 1 และสี Azodisalicylate ในสภาพเมทาโนเจนิค พบว่ามีการลดสีได้อย่างสมบูรณ์ในถังปฏิกริยายูเอเอสบีเมื่อมีการเพิ่มสารอาหารอื่น (Cosubstrates) โดยพบว่าสาร 5 - Aminosalicylic Acid (5-ASA) และ 1, 4 - Phenylenediamine ซึ่งเป็น Intermediates ที่ได้จากการสลายพันธะของสีอะโซ ถูกตรวจพบได้ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่ามีการ Mineralization ต่อไปอีก สี Azodisalicylate ซึ่งประกอบจากสองโมเลกุลของ 5 - ASA พบว่าถูก Mineralized แม้ระบบจะไม่ได้รับการเติมสารอาหารอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเมตาโบลิซึมสาร 5 - ASA อาจให้ Reducing Equivalents ที่จำเป็นต่อการรีดักชันของอะโซ แสดงว่าสีอะโซบางชนิดสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอน พลังงานและไนโตรเจนสำหรับแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนได้

Carliell *et al.* (1995) อ้างถึงใน Setiadi and Loosdrocht (1997) รายงานว่า การลดสีของสีย้อม Ci 141 ในระบบไร้ออกซิเจนเป็นการลดแบบอันดับที่หนึ่ง โดยเห็นได้จากความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของเวลาที่ผ่านไปกับค่า $\ln C/C_0$

Ilangovan and Briones (1997) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบบยูเอเอสบีกับระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Blanket, EGSB) ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมย้อมผ้า ในถังปฏิกรณ์ขนาด 2.4 ลิตร เวลาเก็บกักน้ำ 1.5 วัน ปริมาตรชั้นตะกอนของระบบอีจีเอสบีขยายร้อยละ 100 ด้วยการหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าถังทำให้มีความเร็วน้ำไหลขึ้น 0.9 ม./ชม. พบว่าระบบอีจีเอสบีสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 76-80 และกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 54-60 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบบยูเอเอสบี โดยให้เหตุผลว่าระบบบยูเอเอสบีมีการสะสมของสารที่ไม่ย่อยสลายและถูกกักไว้ในชั้นตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ในขณะที่ระบบอีจีเอสบีมีความเร็วน้ำไหลขึ้นสูงกว่าอันเนื่องมาจากการหมุนเวียนน้ำออกให้กลับเข้าระบบ ทำให้ไม่เกิดการชะล้าง ไม่เกิดการสะสมสารย่อยสลายยากที่ชั้นตะกอนขยายตัว

Goronszy and Tomas (1992) รายงานว่า ในการบำบัดน้ำเสียย้อมผ้าที่มีสีย้อมอะโซด้วยระบบไร้อากาศ อาจมีสารที่หลุดจากการบำบัดที่เป็นพวกสารอินทรีย์ย่อยสลายยากอยู่ร้อยละ