

บทที่ 2

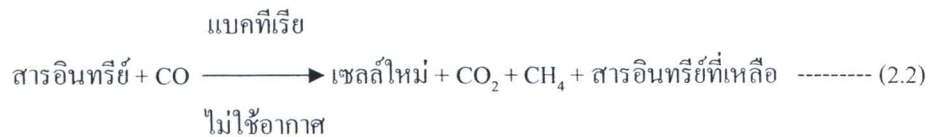
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1. การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน (Anaerobic treatment)

การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนคือกระบวนการที่จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (ไม่มีออกซิเจน) ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง



ภายหลังการบำบัด สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่จะยังมีเซลล์ใหม่เกิดขึ้นน้อย โดยทั่วไปจะเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนต่อไป ซึ่งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนซึ่งเป็นระบบที่อาศัยแบคทีเรียที่ไฮโดรไลซ์ด้วย CO₂ การบำบัดน้ำเสียจึงเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 2.2



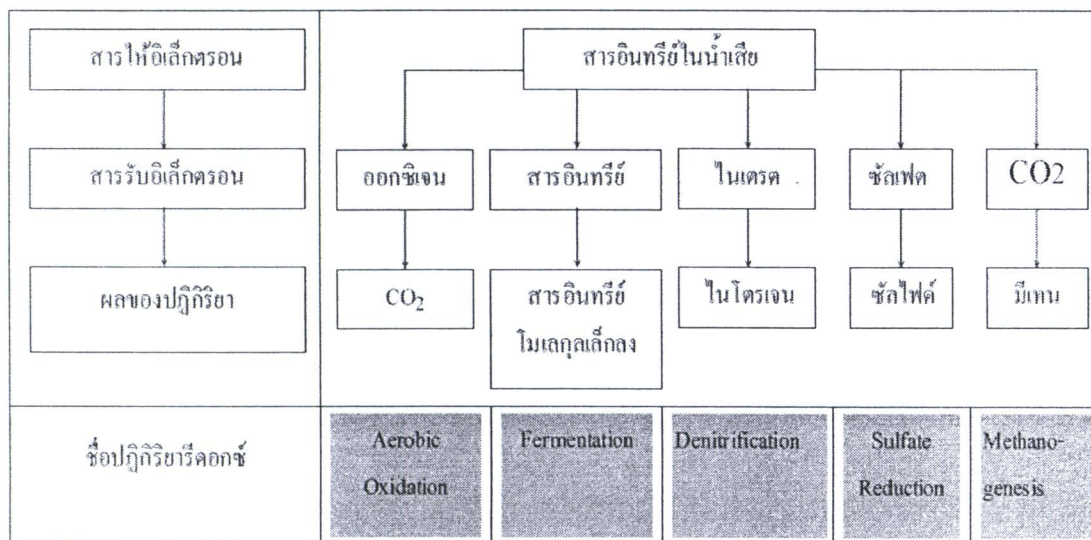
แต่แท้จริงแล้ว ในโลกของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนยังมีแบคทีเรียอื่นที่ไม่ได้ไฮโดรไลซ์ด้วย CO₂ หรือ O₂ อีกหลายชนิดแบคทีเรียเหล่านี้มีชีวิตอยู่ได้โดยไฮโดรไลซ์สารอินทรีย์ เช่น NO₃, SO₄, Fe₂O₃, MnO₂ เป็นต้น

ปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน ล้วนแต่มีกลไกพื้นฐานร่วมกัน คือทั้งคู่เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชันหรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสาร โดยมีการให้และรับอิเล็กตรอน สารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอนเนื่องจากมีพลังงานอยู่ในตัวสูง และสารอย่างอื่นที่อยู่ในน้ำเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนปฏิกิริยาก็เป็นแบบใช้ออกซิเจน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช่ออกซิเจนแต่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือซัลเฟต ปฏิกิริยาก็เป็นแบบไร้ออกซิเจน ปฏิกิริยารีดอกซ์ในน้ำเสียแสดงดังภาพที่ 2-1

นอกจากนี้กระบวนการไร้ออกซิเจนยังมีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการแบบใช้ออกซิเจนอย่างเด่นชัดหลายประการ คือ

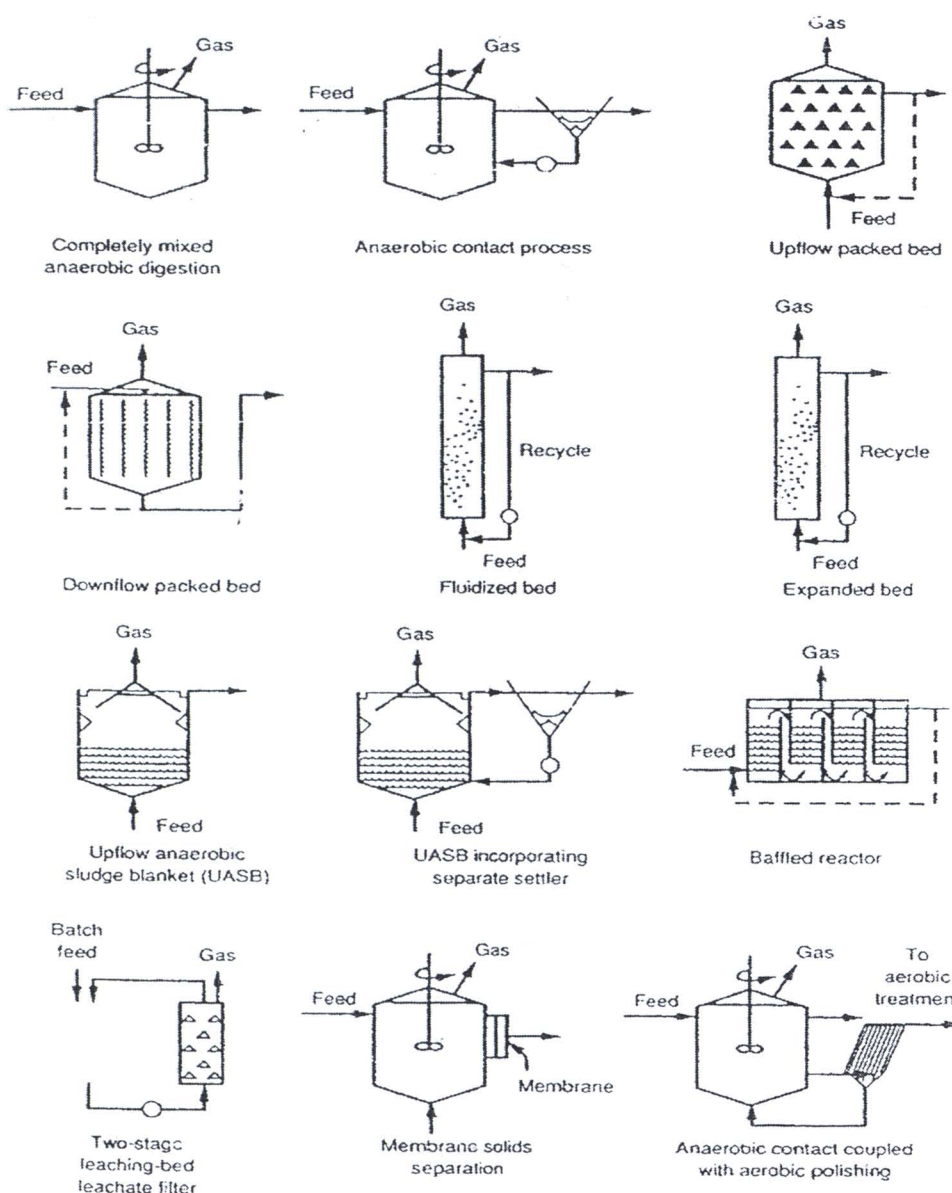
- กระบวนการไร้ออกซิเจนได้ก๊าซมีเทนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา
- มีอัตราการสร้างตะกอนต่ำมาก
- ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมากได้
- มีเสถียรภาพต่ำ

- ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในสัดส่วนของ BOD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2



ภาพที่ 2-1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในน้ำเสีย (มันสิน คัมภลเวศน์, 2542)

กระบวนการไร้ออกซิเจน (Anaerobic treatment) สำหรับน้ำเสียใช้ประโยชน์ใน 2 รูปแบบ คือ การสร้างเสถียรภาพให้ตะกอนอินทรีย์ โดยเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยการย่อยสลายตะกอนสารอินทรีย์หรือ ตะกอนซึ่งเป็นจุลินทรีย์ ที่ได้จากถังตกตะกอนขั้นต้น และถังตกตะกอนขั้นสุดท้ายจากการบำบัดแบบชีวภาพชนิดต่างๆ ซึ่งกระบวนการไร้ออกซิเจนที่มักใช้ก็คือ ถังหมักแบบธรรมดา (Conventional anaerobic digestion) หรือถังหมักแบบสองเฟส (Two-phase anaerobic digestion) และใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นหลัก ซึ่งกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ ระบบ Anaerobic Contact, Anaerobic Filter, Anaerobic Fluidized Bed (AFB), Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกันไป โดยลักษณะของระบบไร้ออกซิเจนแบบต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ลักษณะของระบบไร้ออกซิเจนต่างๆ (Metcalf and Eddy, 1991)

2. กระบวนการเปลี่ยนรูปในระบบไร้ออกซิเจน

2.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมันและ โปรตีน จะทำให้โมเลกุลเล็กลง และละลายน้ำได้ภายนอกเซลล์ โดยมีเอนไซม์ (Extracellular enzyme) ที่ถูกปล่อยออกมา โดยแบคทีเรียจำพวก Acidogenic โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมันจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโน น้ำตาล และ กรดไขมัน (long-chain fatty acid) การย่อยสลายในขั้นตอนนี้ค่อนข้างช้า ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น พีเอช เวลาพักเซลล์ (Cell residence time) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของสารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ๆ และมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ จะใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าสารที่มีอนุภาคเล็ก

2.2 อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

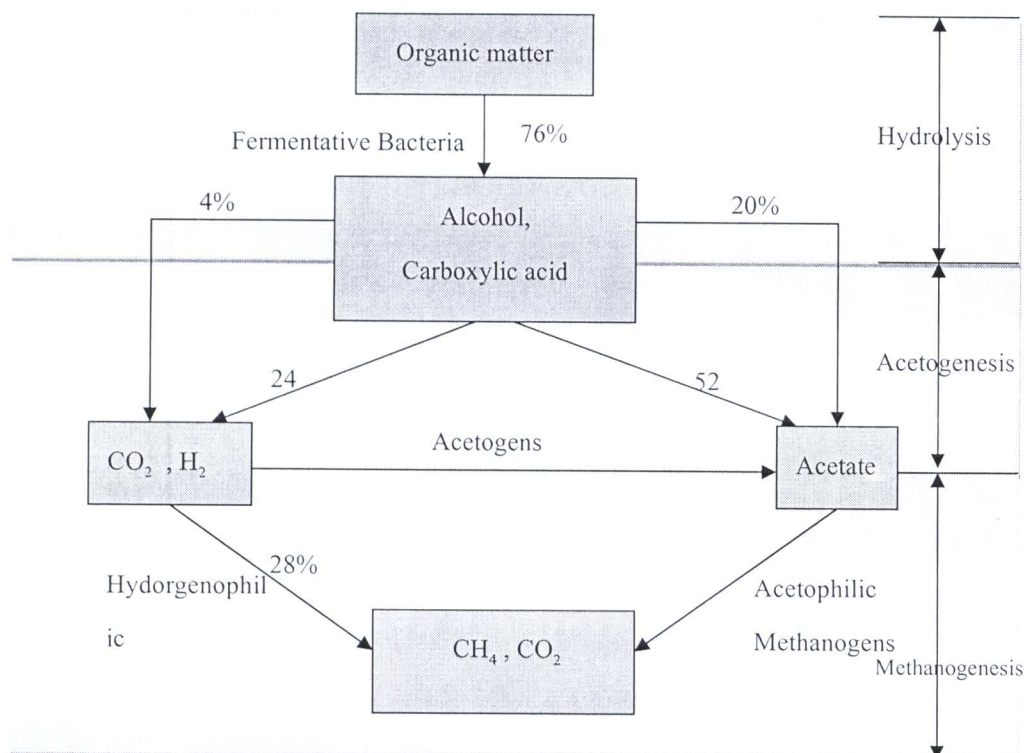
โมเลกุลของสารอินทรีย์จากขั้นตอนที่ 1 ได้แก่ กรดอะมิโน, น้ำตาล และกรดไขมัน จะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานของแบคทีเรียสร้างกรด โดยผ่านกระบวนการหมัก ภายในเซลล์ และถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และคาร์บอนไดออกไซด์ ผลสุดท้ายของขั้นตอนที่ 2 ที่ได้จากการหมัก จะเป็นสารอะไร ขึ้นอยู่กับสารที่ผ่านจากขั้นตอนที่ 1 และ hydrogen partial pressure

2.3 อะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

เนื่องจาก Methanogenic organisms สามารถผลิตมีเทน จากกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลลามีน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทีริก กรดโพรพิโอนิก เป็นสารอาหาร (substrate) ในการผลิตมีเทนได้ แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (hydrogen-producing acetogenic bacteria) สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 (C_2) ไปเป็น กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

2.4 เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis)

ในขั้นตอนนี้ ประกอบไปด้วยแบคทีเรีย 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จากกรดอะซิติก (Acetoclastic Methane Bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจาก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (H-Utilizing Methane Bacteria) แบคทีเรียเหล่านี้สามารถเจริญเติบโตอยู่ในช่วงพีเอชแคบๆ เท่านั้น (ประมาณ 6.7-7.2) อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 30-35 °C ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้า ดังนั้นจึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (rate – limiting step of anaerobic)



ภาพที่ 2-3 การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการไร้ออกซิเจน

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการไร้ออกซิเจน

3.1 อุณหภูมิ (Temperature)

ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 2 ช่วง คือ ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส และช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) ช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิก จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่ามีโซฟิลิก แต่มักจะให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกมากกว่าในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากพวกเทอร์โมฟิลิกจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิมากกว่า ดังนั้นการรักษอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้อุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนอย่างมาก

3.2 พีเอช (pH)

แบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanogens) มีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด โดยที่ช่วงตอนนี้จะเกิดได้ดีในช่วงพีเอช 6.8-8.2 (Speece, 1996) ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) ยังสามารถทำงานได้ดีที่พีเอช 4-6.5 (Speece, 1996) นอกจากนี้ ค่าพีเอชยังส่งผล

ทางอ้อมคือแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน โดยที่ค่าพีเอชดังกล่าวจะส่งผลต่อรูปปฏิกิริยาของสารต่างๆ เช่น Volatile Fatty Acid, NH_3 และ H_2S ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน

3.3 ความเข้มข้นของไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA)

ระบบบำบัดไร้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดี ควรจะมีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกประมาณ 200-400 มก./ลิตร อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของกรดมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกรด โดยที่ระบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของไขมันระเหยสูงกว่า 1,000 มก./ลิตร แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วจะแสดงถึงการเสียสมดุลกับระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชะลอตัวของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ชนิดของกรดไขมันระเหยก็ถือว่ามีความสำคัญ เช่น กรดโพรพิโอนิกสูงกว่า 1,000 มก./ลิตร จะทำให้เกิดปัญหาทั้งความเป็นพิษของกรดชนิดนี้และระดับพีเอชที่ต่ำลง

3.4 ระดับสภาพด่าง (Alkalinity)

สภาพด่างบ่งชี้ให้ทราบถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดที่เพิ่มเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พีเอชลดลงอย่างรวดเร็วและมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทน ระดับสภาพด่างที่จะทำให้มีกำลังบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงก็จะมีโอกาสที่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ดังนั้นกำลังบัฟเฟอร์ของระบบจะต้องเพิ่มขึ้น โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรมีสภาพด่าง 1,500-2,000 มก./ลิตร นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญคือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อระดับของสภาพด่าง ไบคาร์บอเนตในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ระบบจะมีกำลังบัฟเฟอร์สูง เมื่ออัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าพีเอชของระบบกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว

3.5 โออาร์พี (ORP)

โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) โดยแสดงปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทั่วไปจะวัดค่าโออาร์พีได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรตและวัดค่าโออาร์พีที่มีค่าลบในน้ำเสียที่ไร้ออกซิเจน โออาร์พีจะแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย ถ้าวัดค่าโออาร์พีที่มีค่าบวกมากแสดงว่าสารละลายนี้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อยหรือมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี และมีค่าโออาร์พีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง -500 ถึง -300 มิลลิโวลต์

3.6 ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย (Substrate)

สารอาหารในน้ำเสียเกี่ยวข้องโดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบและประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิดกัน มีอัตราการย่อยสลายที่ช้าเร็วต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน

3.7 สารอาหารที่จำเป็น (Nutrients)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนมีข้อดีประการหนึ่ง คือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์

ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน $BOD : N : P = 100 : 1.1 : 0.2$ หรือ $COD : N : P = 350 : 5 : 1$ นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง COD ต่อ N ยังมีผลต่อลักษณะเมืงตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นปุยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวสูงถึง 100 : 10

แบคทีเรียผลิตมีเทนยังต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ (Trace element) มิฉะนั้นระบบอาจไม่ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้เช่น เหล็ก โคบอลท์ นิกเกิล และซิลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดี การเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียเป็นการลำบาก เนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำงานให้โลหะต่างๆตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ปัจจุบันอาจทำได้โดยการเติม Yeast extract

3.8 สารพิษ (Toxic)

น้ำเสียที่นำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจะต้องไม่มีสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ถ้าหากสารเหล่านี้ปริมาณน้อยก็จะมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบได้แก่

3.8.1 กรดไขมันระเหย

กรดไขมันระเหยในปริมาณที่สูงในระบบจะส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชซึ่งลดลงอยู่ในช่วงที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์

3.8.2 แอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่คือ โปรตีนหรือยูเรีย โดยทั้งนี้ในไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังสมการที่ 2.8



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา โดยที่ NH_3 จะยับยั้งการทำงานและเป็นพิษมากกว่า NH_4^+

3.8.3 ซัลไฟด์

พิษของซัลไฟด์เกิดขึ้นได้เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณซัลไฟด์มาก หรือเกิดการย่อยสลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือเกิดการย่อยโปรตีนซัลไฟด์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยทั้งนี้สารประกอบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำ ขึ้นกับไอออนบวกที่รวมอยู่ โดยถ้ารวมตัวกับโลหะหนักก็จะอยู่ในรูปของตะกอน ส่วนที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์ที่ไร้ออกซิเจนสามารถทนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำที่มีความเข้มข้นถึง 50 มก./ลิตร ถึง 100 มก./ลิตร แต่ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ลิตร จะเป็นพิษ การลดพิษซัลไฟด์ทำได้โดยการตกตะกอนซัลไฟด์หรือแยกซัลไฟด์ของน้ำเสียออกก่อนเข้าระบบ

3.8.4 ไอออนและโลหะหนัก

ไอออนหรือโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงเกินปริมาณหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อระบบได้ ไอออนที่สำคัญได้แก่ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ S^{2-} ไอออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าไอออนลบ นอกจากนี้ไอออนบวกที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ถึง 10 เท่า

ส่วนโลหะหนักที่มีพิษต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้แก่ แมงกานีส แคลเซียม สังกะสี นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของไอออน พิษของโลหะหนักจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะหนัก อย่างไรก็ตามไอออนต่างๆนี้บางชนิดจำเป็นต้องมีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อเป็นสารอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

3.8.5 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน สารพวกนี้ ได้แก่ แอลกอฮอล์ และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เช่นเมทานอล ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้จุลินทรีย์คุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10,000 มก./ลิตร ก็ตาม

4. ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)

4.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของระบบ UASB ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในเวลาไม่นานนัก Standers ได้ทำการศึกษาในปี 1966 พบว่าการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้อยู่ในถังหมักจำนวนมาก โดยติดตั้งถังตกตะกอนไว้ตอนบนของถังหมัก จะทำให้เวลาในการบำบัดสั้นลง และยังสามารถที่จะรับปริมาณน้ำเสียเข้าระบบได้มากขึ้นด้วย การมี High loading rate จะทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งทำให้การผสมที่ดีในชั้น Bed และ Blanket

Lettinga และคณะได้พัฒนาระบบดังกล่าวในปี 1980 โดยเลี้ยงจุลินทรีย์เกาะตัวเป็นกลุ่มเป็นเม็ด พร้อมทั้งพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกก๊าซชีวภาพ น้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-Solid Separator ; GSS) เพื่อช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น และมีการสะสมของตะกอนในส่วนล่างของถัง ทำให้อายุตะกอนสูง นอกจากนี้ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังลอยขึ้นสู่ส่วนบนของถังจะช่วยให้เกิดการกวนผสมภายในชั้นตะกอน จึงเริ่มมีการใช้ระบบ UASB เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

4.2 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบการทำงานของระบบ UASB เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการฉีดพ่นน้ำเสียจากด้านล่างสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยไม่ต้องมีสารตัวกลางหรือวัสดุอื่นใดมาช่วยพยุงจุลินทรีย์ และลักษณะทั่วไปของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี จะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม หรือทรงกระบอก แสดงดังภาพที่ 2-4 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

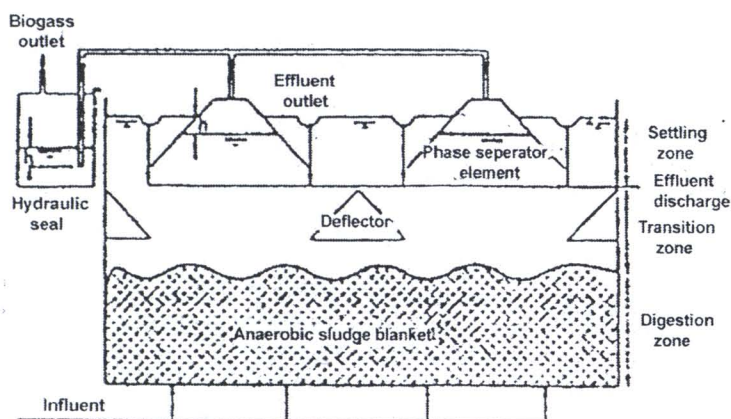
1) ส่วนที่เป็นถังหมักพร้อมด้วยระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์

2) ส่วนที่แยกน้ำ ก๊าซ และตะกอนแขวนลอย ซึ่งอยู่ส่วนบนของถังหมัก โดยมีอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-Solid Separator ; GSS) ออกจากกัน ประกอบด้วยแผ่นเอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา (Kroeker et al., 1979) นอกจากนี้ ยังช่วยในการป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ฟุ้งกระจายโดยก๊าซชีวภาพหลุดออกไปจากถังหมัก ในการทำงานของระบบ UASB จะมีการเติมเชื้อเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่น และรวมเป็นเม็ดหรือเกร็ด ทำให้มีความเร็ว

ในการจมตัวลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์สูง (High setting velocity) รวมเป็นชั้นของ sludge bed ส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่า จะลอยอยู่เป็นชั้นตะกอนแขวนลอย (Sludge blanket)

วัตถุประสงค์ในการติดตั้ง GSS สำหรับ UASB (Lettinga and Hulshoff Pol, 1991) มีดังนี้

- 1) เพื่อแยก และนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกจากถังปฏิกรณ์
- 2) เพื่อป้องกันการหลุดออก (Wash out) ของจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น
- 3) เพื่อให้ตะกอนตกตะกอนกลับไปที่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์
- 4) เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย (Sludge blanket) ขยายตัวและฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็วเข้าไปในส่วนตกตะกอนที่อยู่ด้านบนของถัง
- 5) เพื่อเป็นการทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพที่ดี



ภาพที่ 2-4 ส่วนประกอบของระบบยูเอสบี (Van Haandel and Lettinga, 1994)

น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ผ่านระบบแพร่กระจายน้ำเสีย ระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่าน และเกิดการสัมผัสกับชั้นตะกอนจุลินทรีย์ก็จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ ทำให้เกิดเซลล์ของแบคทีเรีย และก๊าซชีวภาพต่างๆ โดยที่ก๊าซเหล่านี้จะเกาะติดอยู่กับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากความเร็วของน้ำเสียที่ไหลขึ้นประกอบกับก๊าซที่เกิดขึ้น ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอยและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ และเมื่อน้ำเสียไหลขึ้นไปยังส่วนบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ (GSS) น้ำเสียจะเกิดการปะทะกับแผ่นกั้นและก๊าซที่เกาะกับกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออกโดยไหลไปยังส่วนบนออกไปตามท่อไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ น้ำเสียจะถูกแยกออกจากตะกอนจุลินทรีย์และไหลล้นออกไปนอกถังปฏิกรณ์ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะถูกดักและตกลงกลับไปยังชั้นของตะกอนด้านล่าง (Metcalf and Eddy, 1991)

จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญของระบบ UASB คือการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะเป็นเกล็ดหรือเม็ด ซึ่งมีความหนาแน่น และน้ำหนักมาก เพื่อที่จะตกตะกอนได้ดี เป็นสิ่งสำคัญของระบบนี้ เพราะถ้าไม่มีการรวมตัวเป็นเม็ด หรือเกล็ด จะทำให้เกิดการหลุด (Wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ได้ เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

หรืออาจล้มเหลวได้ นอกจากนี้การป้องกันน้ำเสียที่เข้าระบบไม่ให้เกิดเป็นช่อง (Channeling) ก็เป็นสิ่งสำคัญ เพราะมีจะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบลดลงได้

การทำงานของระบบ UASB จะต้องทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ถังยูเอสบีก่อน และรักษา สภาพแวดล้อมในถังปฏิกิริยาให้เหมาะสมต่อการเกิดชั้นตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge bed) ซึ่งจะมีความเข้มข้น ประมาณ 40-100 กก.VSS/ลบ.ม. ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นและเกิดการรวมตัวกัน โดยกลุ่มของ แบคทีเรียจนกระทั่งมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) ซึ่งมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดี ลักษณะของเม็ด ตะกอนจุลินทรีย์จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียที่ถูกบำบัดและเชื้อจุลินทรีย์ที่เอามาเลี้ยง เพื่อเริ่มต้นระบบ (Start up)

4.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอสบี

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอสบี ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสภาวะการขาดแคลนพลังงาน ในปัจจุบันทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการแยกเชื้อแบคทีเรีย เช่น พวก Methanogenic ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์ สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียพวก Anaerobic มากขึ้น การใช้ระบบยูเอสบี ในการบำบัด น้ำเสีย มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีได้แก่

- 1) ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง
- 2) เกิดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อยและตะกอนมีความคงตัวสูง
- 3) สามารถรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ได้สูงกว่าระบบ ไร้ออกซิเจนแบบอื่น
- 4) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานาน ระบบฟื้นตัวได้เร็ว
- 5) สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษบางอย่างได้ เช่น Halogenated solvents

ข้อเสียได้แก่

- 1) ต้องมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการกวนผสมในชั้นตะกอน
- 2) ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเม็ด มีจะนั้นจะด้อยประสิทธิภาพ
- 3) ระบบปรับตัวได้ไม่ดันท่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณน้ำทิ้ง ปริมาณบีโอดีและซีโอดี และ สภาพแวดล้อมอื่นๆ
- 4) ต้องพยายามรักษาตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม และควบคุมให้เกิดการล้าง ออก (Wash out) น้อยที่สุด
- 5) ต้องใช้เวลาในการ Start up ระบบค่อนข้างนาน
- 6) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิต่ำ

4.4 Granular sludge ในถังปฏิกิริยายูเอสบี (Hulshoff pol et al., 1983)

ลักษณะของ Granular sludge ที่เกิดขึ้นในระบบยูเอสบีขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ (Seed sludge) ส่วนประกอบของน้ำเสีย ตลอดจนการเริ่มต้นขบวนการแบบ ไร้ออกซิเจนและสิ่งแวดล้อมที่เริ่มต้น ซึ่ง อาจมีหลายชนิด ดังนี้

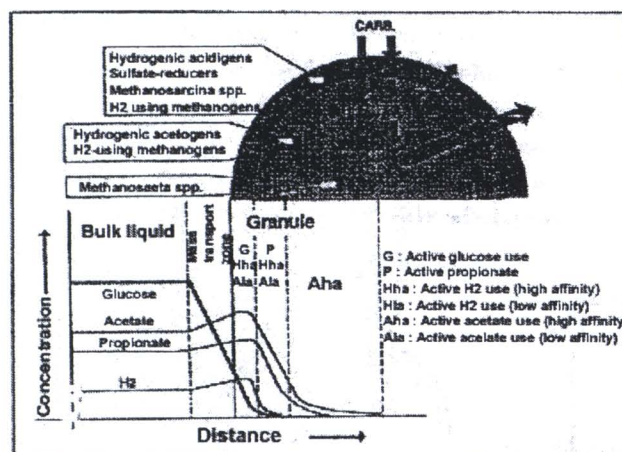
Sarcina granules เป็นชนิดที่มีจุลินทรีย์รูปร่างกลม เกาะกันเป็นกลุ่ม เป็นส่วนใหญ่ Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียที่มีอะเซติกเข้มข้นมากกว่า 1,000 มก./ลิตร และมักมีขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 0.65 มิลลิเมตร) จึงถูกชะล้างออกได้ง่ายและยังเป็นชนิดที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูง

Spinky granular เป็นชนิดที่มีความยาวมากกว่า 1 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งข้าวโพด

Filamentous เป็นจุลินทรีย์ที่มีรูปร่างเป็นแท่งต่อกันเป็นสายยาว ประกอบด้วย Methanotrix ชนิดที่เป็นเส้น Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นจากน้ำเสียที่มีแต่ VFA (Volatile Fatty Acid)

Rod ลักษณะเป็นรูปแท่งประกอบด้วย Methanotrix sp. ชนิดที่เป็นเส้นรวมกันประมาณ 5 เซลล์ พบในถังหมักที่บำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันและโรงงานน้ำตาล

โครงสร้างของ Granular sludge ประกอบด้วย Methanotrix aggregates rod เป็นแกนกลาง และล้อมรอบด้วย Methanotrix ที่เป็นเส้นสายล้อมรอบดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของเม็ดจุลินทรีย์ในระบบยูสปีบำบัดน้ำเสียกลูโคส (Guiot et al., 1992)

4.5 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดจุลินทรีย์ (Granules)

Guiot ทำการศึกษาในปี 1992 กล่าวว่า ความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ของแบคทีเรียที่สามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดจุลินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ดีเม็ดจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีข้อดีดังนี้คือ

- 1) มีความหนาแน่นสูง
- 2) เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลาง (Media) จึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถังปฏิกรณ์
- 3) เม็ดจุลินทรีย์มีอัตราส่วนของแบคทีเรียต่อปริมาตรที่สูงมาก

4.6 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol et al. (1983) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยสังเกตจากพฤติกรรมในการคงอยู่หรือหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 2-6 และได้กล่าวถึงขั้นตอนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ขั้นตอนที่ 1 (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)

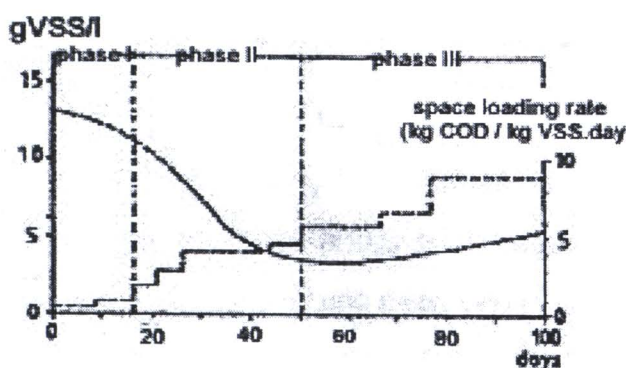
เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อได้ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอสบีแล้ว ชั้นตะกอนด้านล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากน้ำเสียที่ไหลผ่านชั้นตะกอน และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบรวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (Filamentous organisms) ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

- 2) ขั้นตอนที่ 2 (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2-5 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)

ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอย เนื่องมาจากการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้มีปริมาณก๊าซมากขึ้น ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากยังคงอยู่ในระบบ และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่อาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งถือได้ว่าเป็นการคัดเลือกพันธุ์ของระบบ

- 3) ขั้นตอนที่ 3 (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 5 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีมากกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบของตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อระบบผ่านขั้นตอนนี้ไปแล้ว ระบบจะสามารถปรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ได้มากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมา อาจรับได้ถึง 50 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



ภาพที่ 2-6 การเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ระหว่างเฟสการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังยูเอสบี (Hulshoff Pol et al., 1983)

5. การแยกการเกิดปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน (Two-Phase Process)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ ไฮโดรไลซิส การสร้างกรดอินทรีย์ และการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการ

สร้างก๊าซมีเทนนั้นต่ำกว่าในอีก 2 ขั้นตอน ดังนั้นอัตราการเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป จึงขึ้นกับตอนการสร้างก๊าซมีเทน (แต่ในกรณีของน้ำเสียที่มีสารประกอบพวกเซลลูโลสสูง พบว่าขั้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย) โดยทั่วไป ในระบบบำบัดแบบดั้งเดิมและแบบประสิทธิภาพสูง มักใช้ถังหมักเพียงถังเดียว ซึ่งปฏิกิริยาชีวเคมีทั้งสามขั้นตอนเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ในถังหมักที่มีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสมกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่ำกว่าแบคทีเรียในกลุ่มอื่นอีกทั้งยังมีอัตราการเติบโตที่ต่ำกว่า เป็นผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบหมักแบบสองขั้นตอนนั้น

หลักการทำงานของระบบ คือใช้ถังหมัก 2 ถังต่อเนื่องกัน โดยมีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้ในถังหมักแรก เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิส และการสร้างกรดอินทรีย์ ส่วนในถังหมักที่สอง เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสม และอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนแตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ถังหมักสองถังจึงทำให้สามารถควบคุมสภาวะและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้

5.1 ข้อดีข้อเสียของระบบหมักแบบ 2 เฟส

ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน มีข้อดีเหนือกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวดังนี้ (Ghosh, Conrad and Klass, 1975)

- 1) สามารถปรับสภาวะภายในถังหมัก ให้เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มได้
- 2) ช่วยลดขนาดของถังหมัก ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและในการทำงานลงได้
- 3) อัตราการย่อยสลายสูงขึ้น ทำให้อัตราการผลิตและปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย
- 4) ลดปริมาณความร้อนที่ต้องการ และเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อน
- 5) ลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียที่ออกจากระบบ โดยมีการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายในเตรต และ liquefaction ในน้ำเสียที่เข้าระบบในถังหมักกรด

ข้อเสียของระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน คือ ต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุม และต้องเพิ่มเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการวัดและควบคุมระบบเข้ามา จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบไม่แตกต่างจากระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงนัก

5.2 เทคนิคในการแยกออกเป็น 2 เฟส

จุดประสงค์ในการแยกออกเป็นกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ และกลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน เพื่อมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทนในปริมาณที่พอเหมาะในถังหมักแต่ละถัง เพื่อให้อัตราการสร้างกรดและการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยการควบคุมถังหมักแต่ละถังแยกจากกัน อย่างไรก็ตามในถังหมักกรดก็ยังมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอยู่และในทางกลับกันในถังหมักมีเทน ยังคงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดร่วมอยู่ด้วย แต่มิได้เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนตามลำดับ

การแยกออกเป็น 2 เฟส สามารถทำได้โดย (Ghosh, Conrad and Klass, 1975)

- ใช้เยื่อไดอะไลซิส (Dialysis membrane) ซึ่งจะเลือกให้เฉพาะแบคทีเรียบางชนิดเท่านั้นที่ผ่านเยื่อไปได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยากและเยื่อที่ใช้มีราคาแพงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้

- ใช้ตัวยับยั้งที่เหมาะสม สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ตัวยับยั้ง ได้แก่ ออกซิเจน, ไนเตรต, ซัลเฟต หรือ โลหะ แต่เนื่องจากการหาตัวยับยั้งและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมนั้นทำได้ยาก จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เช่นกัน

- ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูงๆ ซึ่งจะทำให้มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูง มีผลในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักกรดโดยตรง

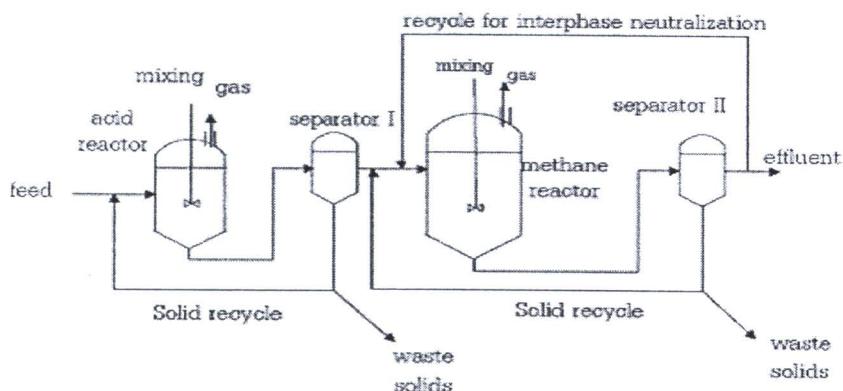
- การควบคุมทางจลนพลศาสตร์ (kinetic control) เป็นการควบคุมการทำงานของถังหมักที่อัตราการเจือจาง (dilution rate) และอัตราส่วนการรีไซเคิล (recycle ratio) ซึ่งมักจะใช้อัตราการเจือจางในถังหมักกรดสูง (หรือใช้ระยะเวลาพักเก็บน้ำเสียในถังหมักต่ำ) เพื่อให้ในถังหมักกรดมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ยาวนานกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและมีการนำเอาตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักแต่ละถังกลับไปใช้อีก เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในถังหมัก

เทคนิคที่เหมาะสมที่สุดคือ การควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยการใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในถังหมักกรดสูง (HRT ต่ำ) ส่วนในถังหมักมีเทนนั้นให้ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่าในถังหมักกรด (HRT ยาวนานกว่า)

5.3 ลักษณะการทำงานของระบบ

เนื่องจากความแตกต่างในลักษณะการเติบโต อาหารที่ต้องการ และสภาวะในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน จึงทำให้ต้องมีการแยกการย่อยสลายออกเป็น 2 เฟส ในระบบประกอบด้วย ถังหมักจำนวน 2 ถังต่ออนุกรมกัน โดยในแต่ละถังหมักจะมีการควบคุมสภาวะอย่างดี และมีการควบคุมสภาวะต่างๆ รวมทั้งอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้เหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม เพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยในถังหมักแรก หรือถังหมักกรด จะควบคุมสภาวะให้เหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด เกิดการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ ได้กรดไขมันระเหย (VFA) เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนในถังหมักสอง หรือถังหมักมีเทน (มีขนาดใหญ่กว่าถังหมักกรด) มีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยใช้กรดไขมันระเหยจากถังหมักกรดเป็นอาหารของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วย มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ตะกอนแบคทีเรียที่ออกจากถังหมักแต่ละถัง จะถูกนำกลับมาใช้ในถังหมักอีก เช่นเดียวกับใน Contact Process ขนาดของถังหมักและอัตราส่วนการรีไซเคิลสำหรับแต่ละเฟสขึ้นกับจลนพลศาสตร์ ในการเติบโต (growth rate) ของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ภาพที่ 2-7 แสดงรูปแบบระบบหมักแบบ 2 เฟส

เนื่องจากในขั้นตอนแรกได้กรดไขมันระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ ในบางครั้งจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมพีเอช ในถังหมักมีเทน มิฉะนั้นถ้าพีเอชต่ำเกินไปจะมีผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนได้ การควบคุมพีเอชสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (Influent) หรือการนำน้ำเสียที่ออกจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิล อย่างไรก็ตาม การปรับพีเอชโดยการเติมสารเคมีนั้นไม่ค่อยเหมาะสม เพราะนอกจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีแล้ว ยังอาจทำให้พีเอชของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนสูงเกินไป ซึ่งมีผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2-7 ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนชนิด 2 เฟส (มันสิน คณกุลเวศน์, 2542)

6. การพัฒนาระบบ อื่นๆจากระบบ UASB

6.1 ระบบยูเอสบีแบบ 2 เฟส (two-phase UASB)

เป็นระบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในกลุ่มผู้ออกแบบระบบก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยี UASB ในประเทศไทย ระบบยูเอสบีแบบ 2 เฟสนี้ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 เฟส คือ การผลิตกรด (จะเกิดขึ้นในบ่อหมักกรด) และ การผลิตมีเทน (เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ ยูเอสบี) การทำงานของระบบอาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่ากลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด และแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ซึ่งมีความต้องการที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องของสารอาหาร สภาพทางกายภาพ อัตราการเจริญเติบโต และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการแยกระบบทั้งสองออกจากกันจะช่วยให้ระบบแต่ละขั้นมีประสิทธิภาพดีขึ้น นอกจากนี้ในกรณีที่น้ำเสียมีองค์ประกอบไม่เหมาะสมที่จะเข้าสู่ระบบยูเอสบีโดยตรง การแยกเป็น 2 ระบบเช่นนี้ทำให้ระบบยูเอสบี สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้นและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอีกด้วย (Thaibibogas 2552)

6.2 ระบบอีจีเอสบี (EGSB)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีแนวคิดเช่นเดียวกับระบบยูเอสบี แต่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของตะกอนแบคทีเรียกับน้ำเสียให้มากขึ้น ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น ปรับปรุงให้มีการกระจายน้ำเข้าให้ดีขึ้น เพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นเพื่อเพิ่มโอกาสในการที่ตะกอนสัมผัสกับน้ำเสีย โดยความเร็วน้ำไหลขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 5-15 ม./ชม. การที่ตะกอนสามารถสัมผัสกับน้ำเสียได้มากขึ้น ทำให้ระบบสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงถึง 30 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำที่สูงส่งผลให้ชั้นตะกอนเกิดความปั่นป่วนและฟุ้งกระจายมาก ทำให้ไม่เกิดการอัดตัวของชั้นตะกอน ลดบริเวณที่จะไม่ได้สารอาหาร (Dead Zone) และการที่เพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นต้องใช้น้ำเสียจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดบางส่วนกลับเข้ามาสู่ระบบ ซึ่งช่วยเจือจางน้ำเสียที่เข้าระบบ และลดความเป็นพิษของสารที่เข้าสู่ระบบ ได้อีกด้วย (Thaibibogas 2552)

6.3 ระบบ UASB-IC (Internal Circulation)

เป็นระบบที่มีอัตราการไหลขึ้นของน้ำสูงเช่นเดียวกับระบบอีจีเอสบี โดยถังปฏิกริยาจะมีความสูงตั้งแต่ 16-25 ม. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.5-12 ม. จึงเป็นถังปฏิกริยาที่มีสัดส่วนระหว่างความสูงต่อพื้นที่หน้าตัดสูง ภายในถังจะแบ่งเป็นสองส่วนด้วยอุปกรณ์ค้ำก๊าซ ปฏิกริยาสร้างมีเทนสามารถเกิดได้ทั้งสองส่วน แต่การย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพจะเกิดขึ้นในส่วนล่างของถังปฏิกริยาเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกแยกและสะสมอยู่ในส่วนแยกก๊าซด้านล่าง เมื่อปริมาณก๊าซสะสมได้มากขึ้น ก๊าซจะลอยตัวขึ้นด้านบนและมีการค้ำน้ำเสียน้ำมาด้วยซึ่งเรียกว่า Gas Lift เมื่อก๊าซไหลไปถึงส่วนรวบรวมก๊าซซึ่งอยู่ด้านบนสุดของถังปฏิกริยา น้ำเสียและก๊าซชีวภาพจะแยกตัวออกจากกัน โดยน้ำเสียน้ำจะไหลกลับลงด้านล่างเพื่อช่วยในการกวนผสม จึงเรียกว่าเป็นถังปฏิกริยาแบบหมุนเวียนภายในหรือ Internal Circulation สำหรับในส่วนบนของถังปฏิกริยาจะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือจากบริเวณด้านล่างเป็นการช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ระบบ (Thaibogas 2552)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดร. สุเมธ ชวเดช (2540) ได้ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุราแสงโสม ระบบยูเอเอสบี สองขั้นตอนแบ่งออกเป็นถังยูเอเอสบีที่มีตัวกลางตัวกลาง ดังปริมาตร 6.8 ลิตร อุณหภูมิที่ใช้ 55 °C ค่าซีโอดีน้ำเสียเข้าระบบ 120,020 มก./ลิตร อัตราการระบรทุกอินทรีย์ 13.05 กก. ซีโอดี/ลบ.ม. -วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 52% ระยะเวลาเก็บกัก 1.2 วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ 0.064 ลบ.ม./กก.ซีโอดีเข้าระบบ จากการทดลองที่อัตรารับภาระอินทรีย์ 2.03 กก. ซีโอดี/ลบ.ม. -วัน จะทำให้ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี มากสุดที่ 58% และ อัตรารับภาระอินทรีย์ 6.38 กก. ซีโอดี/ลบ.ม. -วัน จะทำให้ การเกิดมีเทนมากที่สุด 44 ลิตร/วัน ระบบหมักที่ทำการศึกษานี้ มีระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย คือ 1.4-17.5 วันซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบหมักขั้นตอนเดียว ซึ่งมีระยะเวลากักเก็บน้ำยาวนานกว่า 9-42 วัน และ การทดลองนี้มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลบ.ม./ลบ.ม.-วัน) สูงกว่าถังหมักอุณหภูมิสูงขั้นตอนเดียวประมาณ 4 เท่า

Guiot and Vanden Berg (1985) ทดลองเพิ่มเติมโดยใช้ถังหมักแบบแอนแอโรบิกไฮดรอลิยูเอเอสบีขนาดเดิม น้ำเสียที่ใช้ในการป้อนและอัตราป้อนอินทรีย์ สภาวะการทดลองเหมือนเดิม โดยพบว่า ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่า 25 กก. ซีโอดี/ม³. วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะไม่ขึ้นกับค่า VSS แต่ถ้าอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 25 กรัม ซีโอดี/ม³.วัน ที่ VSS 20.2 กรัม/ลิตร อัตรากำจัดซีโอดีมีค่าคงที่ไม่เพิ่มตามอัตราป้อนสารอินทรีย์ แต่ที่ VSS 28.5 กรัม/ลิตร อัตรากำจัดซีโอดีจะเพิ่มตามอัตราป้อนสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังสรุปผลของสารอินทรีย์กับ VSS ที่มีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีเท่ากับ 96% ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 5 ถึง 25 กรัมซีโอดี/ลิตร.วัน 63% ที่ 36 กรัมซีโอดี/ลิตร.วัน ที่ VSS 20.2 กรัม VSS / ลิตร ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 51 กรัมซีโอดี/ลิตร.วัน ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดี 64% VSS 28.5 กรัม VSS / ลิตร

Guiot et al. (1986) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระบบยูเอเอสบีกับระบบแอนแอโรบิกไฮดรอลิยูเอเอสบี โดยใช้น้ำเสียที่ค่าซีโอดีหลายความเข้มข้น (10.6 5.6 2.6 กรัมซีโอดี / ลิตร) การทดลองแบ่งเป็น 3 ช่วงอัตราเจือจาง ช่วงที่ 1 dilution rate 1.0 ลิตร/วัน (วันที่ 15-67) ช่วงที่ 2 dilution rate 1.9 ลิตร/วัน (วันที่ 68 ถึง 151) ช่วงที่ 3 dilution rate 3 ลิตร/วัน (วันที่ 152 ถึง 174) ตลอดเวลาทดลองอัตราป้อนสารอินทรีย์จะอยู่ประมาณ 10 กรัม ซีโอดี/

ลิตร.วัน ในช่วงแรกประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของระบบยูเอสบี 95% ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี 96% ในช่วงที่สองประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของระบบยูเอสบี 87% ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี 96% ในช่วงที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของยูเอสบี 83% ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี ยังคงที่ตลอด คือ 96% ส่วนการเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ระบบยูเอสบี 22.4 กรัม VSS/ลิตร ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี 25.2 กรัม VSS/ลิตร ขนาดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อสิ้นสุดการทดลองระบบยูเอสบีมีค่าเฉลี่ยขนาดตะกอน [>3 มม. 11%) (3-2 มม. 32%) และ (2-1.2 มม. 58%)] ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบีมีค่าเฉลี่ยขนาดตะกอน [>3 มม. 23%) (3-2 มม. 35%) และ (2-1.2 มม. 42%)] จะสังเกตได้ว่าระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบีมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบยูเอสบี

Rafael Borja (1995) ได้ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียโรงงานปาล์ม (POME) ในการทดลองใช้ระบบ ยูเอสบี 2 ขั้นตอน โดยถึงแรกเป็นถังยูเอสบีแบบหมักกรด ดังที่สองเป็นถังยูเอสบีแบบหมักก๊าซ ทำการเดินระบบที่อัตราภาระบรทุกอินทรีย์ 16-60 ก.ชีโอดี/ลิตร.วัน เวลาพักเก็บ 0.9 วัน พีเอช 5.8 จากการทดลองระบบทำงานได้ดีที่อัตราภาระบรทุกอินทรีย์ 30 ก.ชีโอดี/ลิตร.วัน ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 90% มีระบบรีไซเคิลน้ำเสียที่ออกจากถังยูเอสบีแบบหมักก๊าซกลับมาสู่ถังยูเอสบีกรด เพื่อปรับ pH อยู่ระหว่าง 6 เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้ต่าง

Ann C. Wilkie (2000) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติของน้ำกากส่าและระบบบำบัดที่ใช้กับน้ำเสียกากส่า ทั้งในสภาวะที่ อุณหภูมิปกติ (Mesophilic) อุณหภูมิสูง (Thermophilic) โดยสรุปไว้ว่า ในสภาวะอุณหภูมิปกติ และ อุณหภูมิสูง มีช่วงที่ระบบทำงานได้ดีในช่วงภาระบรทุกอินทรีย์ 12.25 และ 23.5 ก. ชีโอดี/ลบ.ม. วัน และประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 71.2% และ 60.7% ตามลำดับ

Sharma and Singh (2001) ได้ศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารเล็กน้อย (Trace Nutrients) ต่อการเกิดตะกอนเม็ดในระบบไฮบริด พบว่าการเติม निकิลและโคบอลต์ ช่วยให้เกิดตะกอนได้ดีขึ้น ส่วนการเติมแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้การเกิดตะกอนแย่ลง

Osman Nuri (2004) ได้ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียจากขยะ โดยใช้ระบบ ยูเอสบี 2 ขั้นตอน น้ำเสียจะผ่านเข้าสู่ถังยูเอสบี 1 แล้วไหลล้นเข้าสู่ถังยูเอสบี 2 ตามลำดับ และไหลเข้าสู่ระบบ CSTR โดยมีปริมาตร 2.5 ลิตร และ 9 ลิตร ตามลำดับ ระยะเวลาพักเก็บ 1.25 และ 4.5 วัน ตามลำดับ ค่าชีโอดีเริ่มต้น 5,400 – 20,000 มก./ลิตร ภาระบรทุกอินทรีย์ 4.3-16 กก. ชีโอดี/ลบ.ม. วัน ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 80% ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ไนโตรเจน 99.6%

Vasleios I. (2007) ศึกษาการเปรียบเทียบระบบยูเอสบี ขั้นตอนเดียว กับยูเอสบีสองขั้นตอน ในน้ำเสียโรงงานผลิตน้ำตาล โดยกำหนดให้ถัง CSTR ในสภาวะหมักกรด มีปริมาตร 2-10 ลิตร มีค่าพีเอชต่ำกว่า 4 มีการปรับสภาพค่าง่อนเข้าถังยูเอสบี ระยะเวลาพักเก็บ 6.5-7 ชั่วโมง และต่ออนุกรมกับถังยูเอสบี ที่มีปริมาตร 2 ลิตร มีระยะเวลาพักเก็บ 5-15 ชั่วโมง สามารถรับอัตราภาระบรทุกอินทรีย์สูงสุด 30 กก. ชีโอดี/ลบ.ม. วัน ซึ่งทำการเปรียบเทียบ ในช่วงอุณหภูมิ 37, 30, 25 °C ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มระบบยูเอสบีในขั้นตอน 2 สามารถใช้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 40-50% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 90%