

บทที่ 2

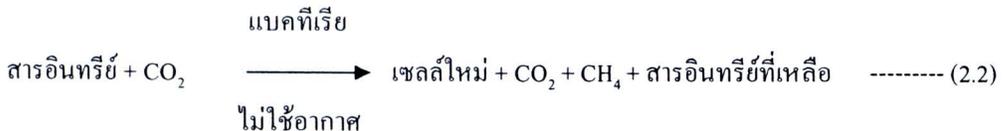
วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน (Anaerobic treatment)

การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบที่เรียกว่าไฮโดรไลซิส ซึ่งการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 (มันสิน ตันฑกุลเวศน์, 2542)



ภายหลังการบำบัด สารอินทรีย์จะเหลืออยู่มากแต่จะมีเซลล์ใหม่เกิดขึ้นน้อย โดยทั่วไปเข้าใจกันว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนหมายถึงระบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ผลิตก๊าซมีเทนซึ่งเป็นระบบที่อาศัยแบคทีเรียที่ไฮโดรไลซิสด้วย CO₂ การบำบัดน้ำเสียจึงเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 2.2



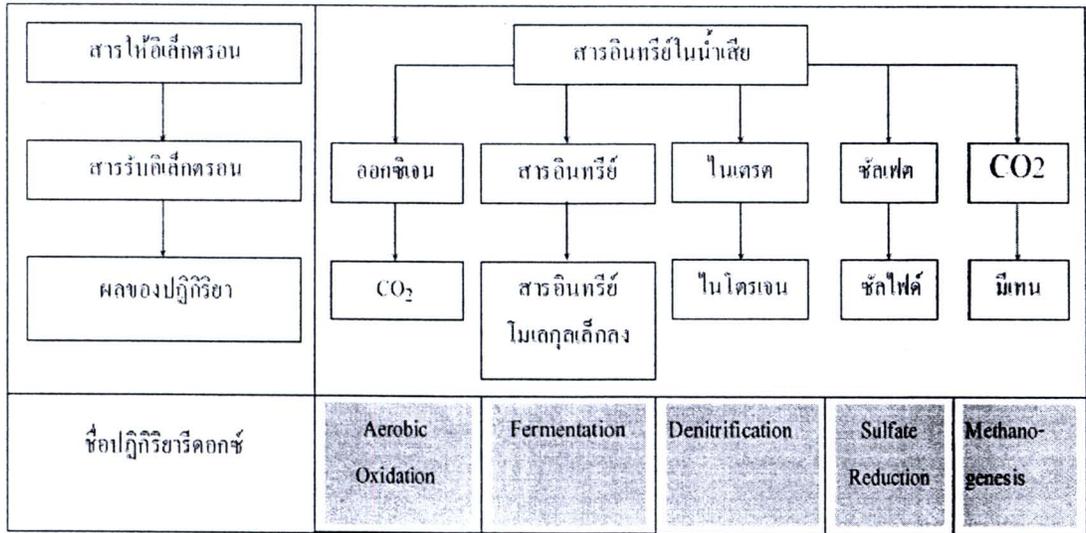
แต่ที่จริงแล้ว ในโลกของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนยังมีแบคทีเรียอื่นที่ไม่ได้ไฮโดรไลซิสด้วย CO₂ หรือ O₂ อีกหลายชนิดแบคทีเรียเหล่านี้มีชีวิตอยู่ได้โดยไฮโดรไลซิสสารอื่น เช่น NO₃, SO₄, Fe₂O₃, MnO₂ เป็นต้น

ปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไร้ออกซิเจน ล้วนแต่มีกลไกพื้นฐานร่วมกัน กล่าวคือทั้งคู่เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชันหรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสาร โดยมีการให้และสารรับอิเล็กตรอน สารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอนเนื่องจากมีพลังงานอยู่ในตัวสูง และสารอย่างอื่นที่อยู่ในน้ำเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนปฏิกิริยาจะเป็นแบบใช้ออกซิเจน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช่ออกซิเจนแต่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือซัลเฟต ปฏิกิริยาจะเป็นแบบไร้ออกซิเจน 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 ตันจุลเวศน์, 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

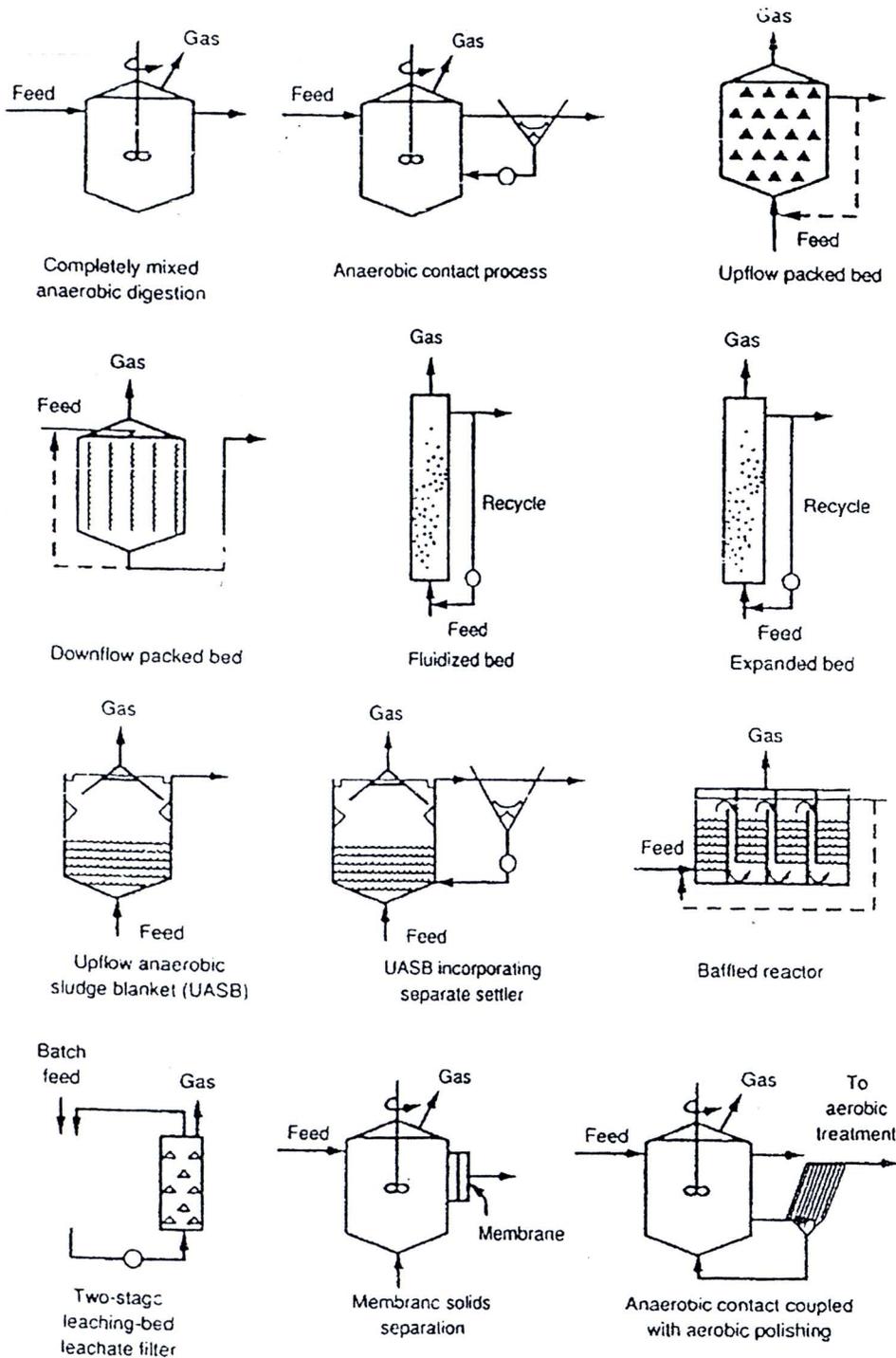
2. กระบวนการเปลี่ยนรูปในระบบไร้ออกซิเจน

การแปลงรูปสาร โมเลกุลใหญ่ที่ซับซ้อน ที่ปรากฏในน้ำเสียให้เป็นก๊าซชีวภาพ ต้องการสารตัวกลางจากจุลินทรีย์ ที่ต่างกันหลายกลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ที่ปรับปรุงจาก Gujer and Zehnder (1983) ขั้นตอนที่แตกต่างกันในถังหมักไร้ออกซิเจนเกิดจากสารตั้งต้นที่ต่างกัน คือ โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต และไขมัน กระบวนการแปลงภาพที่ต่างกันที่กระบวนการ ล้วนมีลักษณะเด่นที่ต่างกัน ดังนี้

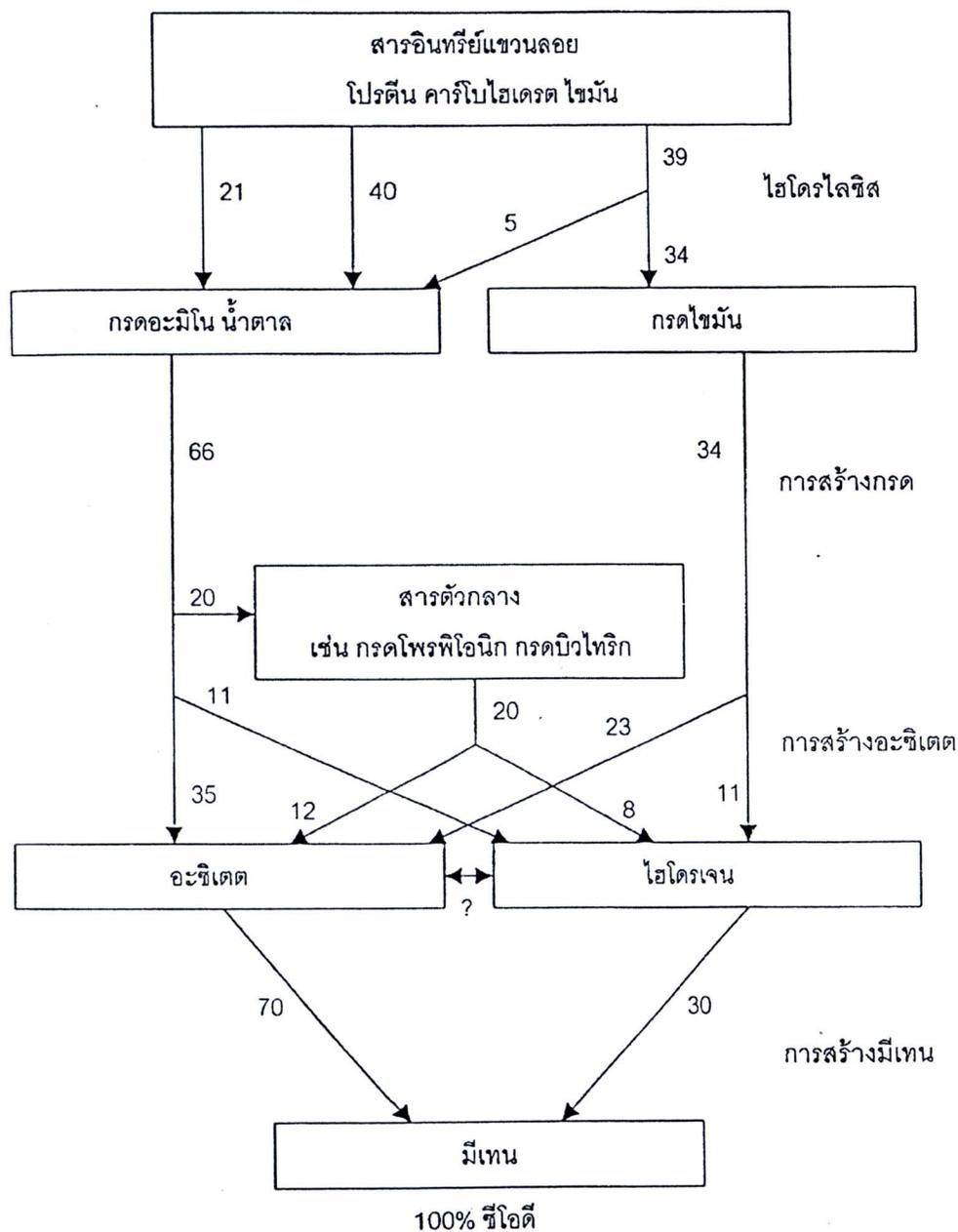
2.1 ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้อนุภาคสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบละลายน้ำที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยลง โดยแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอก โปรตีนจะถูกย่อยเป็นโพลีเปปไทด์ และกรดอะมิโนในที่สุด คาร์โบไฮเดรตจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นน้ำตาลละลาย (โมโนและไดแซคคาไรด์) และไขมันจะถูก

เปลี่ยนเป็นกรดไขมันชนิดยาว และกลีเซอรินโดยทั่วไป โดยที่อัตราการเปลี่ยนรูปของไขมันจะช้าลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส



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

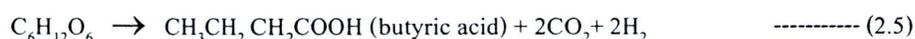
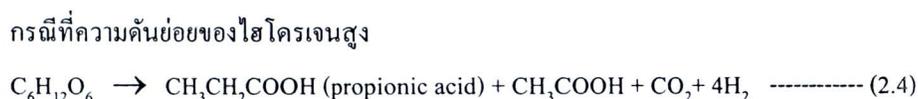


ภาพที่ 2-3 แสดงลำดับการเกิดปฏิกิริยาสำหรับระบบไร้ออกซิเจนของสารประกอบอินทรีย์ซับซ้อน (ตัวเลขคือสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของซีไอดี) (Van Haandel et al., 1994)

2.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

สารประกอบละลายน้ำที่ถูกสร้างขึ้นในขั้นตอนที่แล้ว จะถูกดูดซึมเข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย และเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย กรดอินทรีย์ระเหย แอลกอฮอล์ กรดแลกติก และสารอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กระบวนการสร้างกรดเกิดจากแบคทีเรียที่ต่างกัน หลายกลุ่ม แต่ที่สำคัญที่สุดคือพวกออบลิเกต แอนแอโรบ (obligate anaerobes) อย่างไรก็ตามก็ยังมีพวกแฟคัลทเททีฟ (Facultative) ที่สามารถทำงานได้อยู่บ้าง สิ่งนี้สำคัญต่อระบบบำบัดไร้ออกซิเจน เมื่อมีออกซิเจนละลายน้ำที่เป็นพิษต่อพวกออบลิเกตเช่นเดียวกับการสร้างมีเทน

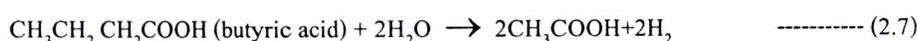
สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายจะเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์และความดันย่อยของไฮโดรเจนในขณะนั้น เช่นการย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดอะซิติกโดยผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Emden – Meyerhoff Pathway ในกรณีที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงหรือต่ำจะเป็นไปตามสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5



ส่วนกรดไขมันชนิดยาวจะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้ความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ และเปลี่ยนเป็นกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริกภายใต้ความดันย่อยไฮโดรเจนสูง

2.3 ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดจะเป็นอาหารให้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนต่อไป แต่เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทริก กรดโพรพิโอนิก เป็นสารอาหารได้ จึงต้องอาศัยแบคทีเรียสร้างอะซิเตตทำการย่อยกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติกเพื่อให้แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ต่อไป ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7

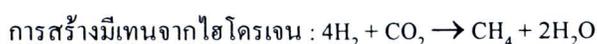
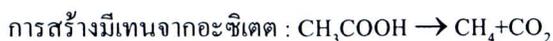


โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันย่อยของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกได้ภายใต้สภาวะที่มีไฮโดรเจนมีความดันย่อยสูง และ

แบคทีเรียประเภทนี้จะมีส่วนช่วยไม่ให้มีการสะสมตัวของกรดบิวทริก และกรดโพรพิโอนิกในถังปฏิกริยาซึ่งเป็นเหตุให้พีเอชลดต่ำลงจนยับยั้งแบคทีเรียสร้างมีเทนได้

2.4 ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

การสร้างมีเทนมักจะเป็นขั้นจำกัดอัตรา (rate-limiting Step) ในกระบวนการหมักทั้งหมด มีเทนถูกสร้างจากอะซิเตต หรือจากการรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์โดยมีไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยแบคทีเรียอะซิโตโทรฟิก (acetotrophic) และไฮโดรจีโนโทรฟิก (hydrogenotrophic) ตามลำดับ



แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าพวกให้อะซิเตต (Henzen and Harremoos, 1983) ดังนั้น การสร้างมีเทนจากอะซิเตตจึงมักจะเป็นอัตราจำกัดการแปลงรูปของสารโมเลกุลใหญ่ที่ซับซ้อนในน้ำเสียให้เป็นก๊าซชีวภาพ

กลุ่มแบคทีเรียที่ต่างกันที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ทั้งหมดในกระบวนการสร้าง (anabolic) และการทำลาย (catabolic) ก่อให้เกิดการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์จากการหมักที่ต่างกัน ชีวมวลใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการแปลงรูปทั้งสี่ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเพื่อความสะดวก สามกระบวนการแรกได้แก่ Hydrolysis, Acidogenesis และ Acetogenesis บางครั้งจะถูกรวมอยู่ด้วยกัน และเรียกว่ากระบวนการสร้างกรด (acid fermentation) ในขณะที่ขั้นที่ 4 เรียกว่า กระบวนการสร้างมีเทน (methane fermentation)

สิ่งสำคัญสองอย่างที่สำคัญเกี่ยวกับกระบวนการที่ต่างกันที่ว่าจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักไร้ออกซิเจน คือ

1) การกำจัดสารอินทรีย์ (ซีโอดี) ระหว่างการสร้างกรดถูกจำกัดโดยการปล่อยไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ 8.3 มีเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ของสารอินทรีย์เท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนจากการใช้ไฮโดรเจน ดังนั้นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในระบบบำบัดไร้ออกซิเจน คือ การสร้างมีเทนจากอะซิเตตที่เพียงพอ

2) การสร้างกรดทำให้พีเอชลดลงเนื่องจากการสร้างกรดไขมันระเหย และสารตัวกลาง (intermediates) อื่นๆ ที่แตกตัวและให้โปรตอนในขณะที่การสร้างมีเทนจะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าใกล้ 7 เท่านั้น ดังนั้น ความไร้เสถียรภาพอาจจะเกิดขึ้นได้เมื่ออัตราการกำจัดกรดโดยการสร้างมีเทนลดลงหลังจากการผลิตกรดเพิ่มขึ้น การสร้างกรดสุทธิจะทำให้พีเอชลดลง และจะทำให้การสร้างมีเทนลดลง โดยทั่วไปสิ่งนี้เรียกว่า การหมิ่นเปรี้ยว (souring) ซึ่งมักจะเกิดในถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจน และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การเดินระบบล้มเหลว อันตรายจากกลิ่นเหม็นเปรี้ยวนี้อาจหลีกเลี่ยงได้โดยการรักษาสัดส่วนของการสร้างกรด และมีเทนให้สมดุลกัน ซึ่งทำได้โดยการรักษาสภาพต่าง และบัฟเฟอร์ไว้ในระดับสูง

แบคทีเรียสร้างมีเทนจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1) Obligate Acetoclastic Methanogen สามารถบริโภคกรดอะซิติกได้เพียงอย่างเดียว โดยใช้เป็นแหล่งพลังงาน

2) Obligate Hydrogenotrophic Methanogen (H_2 – utilizer) เป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตมีเทนได้จากไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว ในกรณีนี้ไฮโดรเจนเป็นพลังงานและมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน

3) Hydrogenotrophic / Acetoclastic Methanogen เป็นพวกที่สามารถผลิตมีเทนได้จากกรดอะซิติก หรือไฮโดรเจน แต่จะชอบไฮโดรเจนมากกว่า

ซึ่งแบคทีเรียพวก Methanogenic นี้ สามารถเจริญเติบโตในช่วงที่มีพีเอชประมาณ 6.8-7.2 และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโต รวมทั้งมักจะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำ (Specific growth rate) ทำให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นช้า และมักเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

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 ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้อุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนอย่างมาก

3.2 พีเอช (pH)

แบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanogens) มีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด โดยที่ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 6.8-7.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) ยังสามารถทำงานได้ดีที่พีเอช 6.0-6.5 นอกจากนี้ ค่าพีเอชยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน โดยที่ค่าพีเอชดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อรูปไอออนของสารต่างๆ เช่น Volatile Fatty Acid, NH_3 และ H_2S ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน

3.3 ความเข้มข้นของไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA)

ระบบบำบัดไร้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดี ควรจะมีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติก ประมาณ 200-400 มก./ล. อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของกรดมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกรด โดยที่ระบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของไขมันระเหยสูงกว่า 1,000 มก./ล. แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วจะแสดงถึงการเสียสมดุลกับระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชะลอตัวของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น นอกจากนี้

ชนิดของกรดไขมันระเหยก็ถือว่ามีความสำคัญ เช่น กรดโพรพิโอนิกสูงกว่า 1,000 มก./ล. จะทำให้เกิดปัญหาทั้งความเป็นพิษของกรดชนิดนี้และระดับพีเอชที่ต่ำลง

3.4 ระดับสภาพด่าง (Alkalinity)

สภาพด่างบอกรับถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดที่เพิ่มเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พีเอชลดลงอย่างรวดเร็วและมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทน ระดับสภาพด่างที่จะทำให้มีกำลังบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงก็จะมีโอกาสที่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ดังนั้นกำลังบัฟเฟอร์ของระบบจะต้องเพิ่มขึ้น โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรมีสภาพด่าง 1,500-2,000 มก./ล. นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญคือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อระดับของสภาพด่างไบคาร์บอเนตในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ระบบจะมีกำลังบัฟเฟอร์สูงเมื่ออัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าพีเอชของระบบกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว

3.5 โออาร์พี (ORP)

โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) โดยแสดงปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทั่วไปจะวัดค่าโออาร์พีได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรตและวัดค่าโออาร์พีมีค่าลบในน้ำเสียที่ไร้ออกซิเจน โออาร์พีจะแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย ถ้าวัดค่าโออาร์พีมีค่าบวกมาก ๆ แสดงว่าสารละลายนี้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อยหรือมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี และมีค่าโออาร์พีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง -500 ถึง -300 มิลลิโวลต์

3.6 ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย (Substrate)

สารอาหารในน้ำเสียเกี่ยวข้องโดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบและประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิดกัน มีอัตราการย่อยสลายที่ช้าเร็วต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่า โปรตีนและไขมัน

3.7 สารอาหารที่จำเป็น (Nutrients)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนมีข้อดีประการหนึ่ง คือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน BOD : N : P = 100 : 1.1 : 0.2 หรือ COD : N : P = 350 : 5 : 1 นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง COD ต่อ N ยังมีผลต่อลักษณะเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นปุยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวสูงถึง 100 : 10

แบคทีเรียผลิตมีเทนยังต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ (Trace element) มิฉะนั้นระบบอาจไม่ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดี การเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียเป็นการลำบาก เนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำงานให้โลหะต่างๆ ตกผลึกแยกออกจากรน้ำได้ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยการเติม Yeast extract

3.8 สารพิษ (Toxic)

น้ำเสียที่นำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจะต้องไม่มีสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ถ้าหากสารเหล่านี้ปริมาณน้อยก็จะมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบได้แก่

3.8.1 กรดไขมันระเหย

กรดไขมันระเหยในปริมาณที่สูงในระบบจะส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชซึ่งลดลงอยู่ในช่วงที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์

3.8.2 แอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่คือ โปรตีนหรือยูเรีย โดยทั้งนี้ไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียไอออน (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 ขึ้นกับอไอออนบวกที่รวมอยู่ โดยถ้ารวมตัวกับโลหะหนักก็จะอยู่ในรูปของตะกอน ส่วนที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์ที่ไร้ออกซิเจนสามารถทนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำที่มีความเข้มข้นถึง 50 มก./ล. ถึง 100 มก./ล. แต่ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษ การลดพิษซัลไฟด์ทำได้โดยการตกตะกอนซัลไฟด์หรือแยกซัลไฟด์ของน้ำเสียออกก่อนเข้าระบบ

3.8.4 อไอออนและโลหะหนัก

อไอออนหรือโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงเกินปริมาณหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อระบบได้ อไอออนที่สำคัญได้แก่ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ S^{2-} อไอออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าอไอออนลบ นอกจากนี้อไอออนบวกที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าอไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ถึง 10 เท่า

ส่วนโลหะหนักที่มีพิษต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้แก่ แมงกานีส แคลเซียม สังกะสี นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของอไอออน พิษของโลหะหนักจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะหนัก อย่างไรก็ตามอไอออนต่างๆนี้บางชนิดจำเป็นต้องมีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อเป็นสารอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

3.8.5 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน สารพวกนี้ ได้แก่ แอลกอฮอล์ และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เช่นเมทานอล ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้จุลินทรีย์คุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่า จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10,000 มก./ล. ก็ตาม

4. ระบบยูเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)

4.1 ความเป็นมาของระบบยูเอสบี

กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของระบบ UASB ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในเวลาไม่นานนัก Standers ได้ทำการศึกษาในปี 1966 พบว่าการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้อยู่ในถังหมักจำนวนมาก โดยติดตั้งถังตกตะกอนไว้ด้านบนของถังหมัก 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 นอกจากนี้ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังจะช่วยให้เกิดการกวนผสมภายในชั้นตะกอน จึงเริ่มมีการใช้ระบบ UASB เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

4.2 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอสบี

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

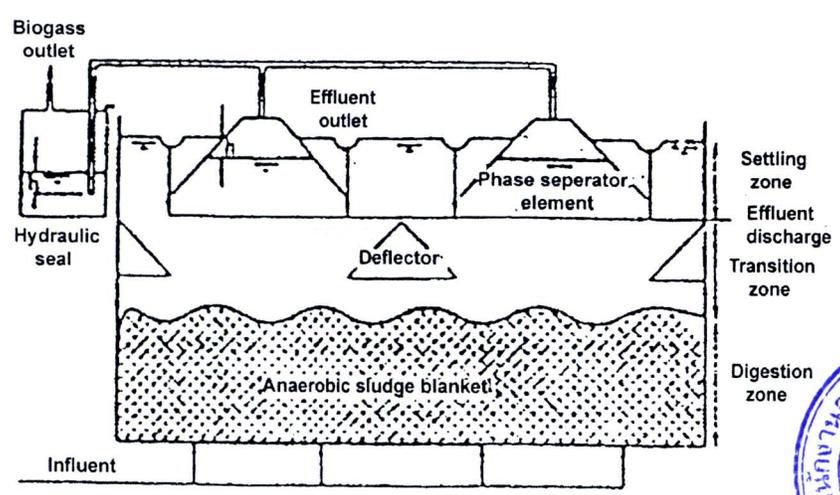
1) ส่วนที่เป็นถังหมักพร้อมด้วยระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์

2) ส่วนที่แยกน้ำ ก๊าซ และ ตะกอนแขวนลอย ซึ่งอยู่ด้านบนของถังหมัก โดยมีอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-Solid Separator ; GSS) ออกจากกัน ประกอบด้วยแผ่นเอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา (Kroeker et al., 1979) นอกจากนี้ ยังช่วยในการป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ฟุ้งกระจายโดยก๊าซชีวภาพหลุดออกไปจากถังหมัก ในการทำงานของระบบ UASB จะมีการเติมเชื้อเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่น และรวมเป็นเม็ดหรือเกร็ด ทำให้มีความเร็วในการจมตัวลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์สูง (High setting velocity) รวมเป็นชั้นของ sludge bed ส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่า จะลอยอยู่เป็นชั้นตะกอนแขวนลอย (Sludge blanket) รายละเอียดของอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-Solid Separator ; GSS) ที่ใช้ในระบบยูเอสบี ที่บำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2-5

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

1) เพื่อแยก และนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกจากถังปฏิกรณ์

- 2) เพื่อป้องกันการหลุดออก (Wash out) ของจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น
- 3) เพื่อให้ตะกอนตกตะกอนกลับไปด้านล่างของถังปฏิกริยา
- 4) เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย (Sludge blanket) ขยายตัวและฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็วเข้าไปในส่วนตกตะกอนที่อยู่ด้านบนของถัง
- 5) เพื่อเป็นการทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพที่ดี

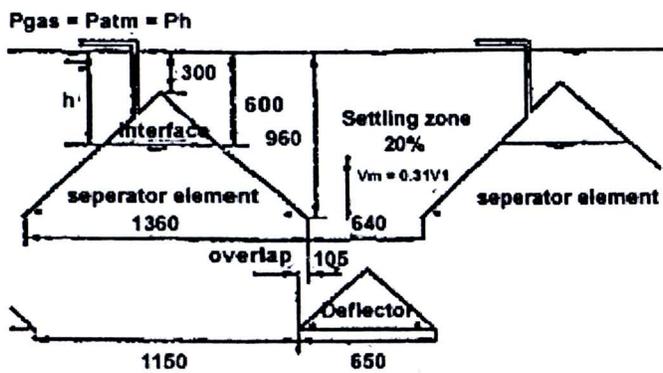


ภาพที่ 2-4 ส่วนประกอบของระบบยูเอสบี (Van Haandel and Lettinga, 1994)

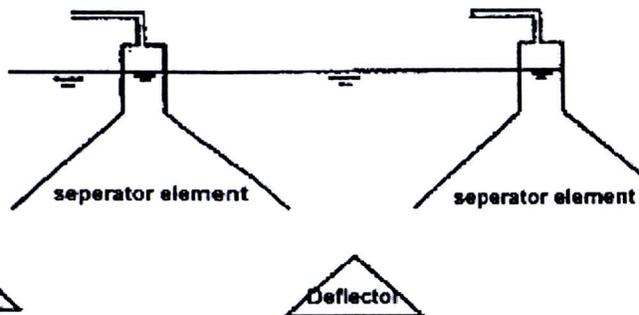
น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างของถังปฏิกริยาผ่านระบบแพร่กระจายน้ำเสีย ระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่าน และเกิดการสัมผัสกับชั้นตะกอนจุลินทรีย์ก็จะเกิดปฏิกริยาการย่อยสลายน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ ทำให้เกิดเซลล์ของแบคทีเรีย และก๊าซชีวภาพต่างๆ โดยที่ก๊าซเหล่านี้จะเกาะติดอยู่กับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากความเร็วของน้ำเสียที่ไหลขึ้นประกอบกับก๊าซที่เกิดขึ้น ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอยและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ และเมื่อน้ำเสียไหลขึ้นไปยังส่วนบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ (GSS) น้ำเสียจะเกิดการปะทะกับแผ่นกั้นและก๊าซที่มาเกาะกับกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออกโดยไหลไปยังส่วนบนออกไปตามท่อไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ น้ำเสียจะถูกแยกออกจากตะกอนจุลินทรีย์และไหลลื่นออกไปนอกถังปฏิกรณ์ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะถูกดักและตกลงกลับไปยังชั้นของตะกอนด้านล่าง (Metcalf and Eddy, 1991)

จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญของระบบ UASB คือการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะเป็นเกล็ดหรือเม็ด ซึ่งมีความหนาแน่น และน้ำหนักมาก เพื่อที่จะตกตะกอนได้ดี เป็นสิ่งสำคัญของระบบนี้ เพราะถ้าไม่มีการรวมตัวเป็นเม็ด หรือเกร็ด จะทำให้เกิดการหลุด (Wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ได้ เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงหรืออาจล้มเหลวได้ นอกจากนี้การป้องกันน้ำเสียที่เข้าระบบไม่ให้เกิดเป็นช่อง (Channeling) ก็เป็นสิ่งสำคัญ เพราะมีฉะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบลดลงได้

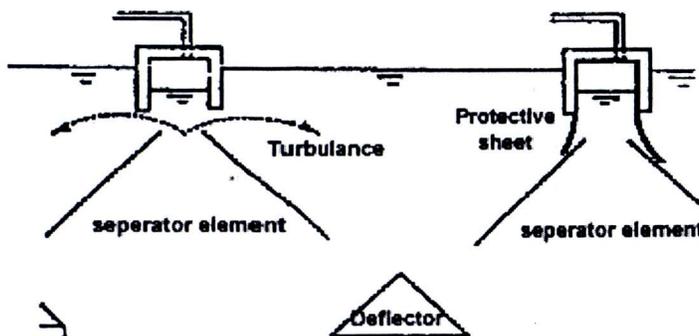
การทำงานของระบบ UASB จะต้องทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ถังยูเอเอสบีก่อน และรักษา สภาพแวดล้อมในถังปฏิกิริยาให้เหมาะสมต่อการเกิดชั้นตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge bed) ซึ่งจะมีความเข้มข้น ประมาณ 40-100 กก.VSS/ลบ.ม. ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นและเกิดการรวมตัวกัน โดยกลุ่มของ แบคทีเรียจนกระทั่งมีลักษณะเป็นเม็ด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



(a) Submerged separator (Pedregal)



(b) Separator with gas under atmospheric pressure



(c) Hybrid separator with opening for maintenance

Example of the design of a GLS separator in the UASB reactors constructed at (a) Pedregal, (b) Cali and (c) Jeremias, Brazil

ภาพที่ 2-5 รายละเอียดของอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-Solid Separator ; GSS) ที่ใช้ใน ระบบยูเอเอสบี ที่บำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศต่างๆ (Van Haandel and Lettinga, 1994)

4.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสภาวะการขาดแคลนพลังงานในปัจจุบันทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการแยกเชื้อแบคทีเรีย เช่น พวก Methanogenic ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียพวก Anaerobic มากขึ้น การใช้ระบบยูเอเอสบี ในการบำบัดน้ำเสีย มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีได้แก่

- 1) ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง
- 2) เกิดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อยและตะกอนมีความคงตัวสูง
- 3) สามารถรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ได้สูงกว่าระบบไร้ออกซิเจนแบบอื่น
- 4) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานาน ระบบฟื้นตัวได้เร็ว
- 5) สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษบางอย่าง ได้ เช่น Halogenated solvents

ข้อเสียได้แก่

- 1) ต้องมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการกวนผสมในชั้นตะกอน
- 2) ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเม็ด มิฉะนั้นจะด้อยประสิทธิภาพ
- 3) ระบบปรับตัวได้ไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำทิ้ง ปริมาณบีโอดีและซีโอดี และสภาพแวดล้อมอื่นๆ
- 4) ต้องพยายามรักษาตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม และควบคุมให้เกิดการล้างออก (Wash out) น้อยที่สุด
- 5) ต้องใช้เวลาในการ Start up ระบบค่อนข้างนาน
- 6) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิต่ำ

4.4 ประเภทของ Granular sludge ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี (Lettinga et al., 1983)

ลักษณะของ Granular sludge ที่เกิดขึ้นในระบบยูเอเอสบีขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ (Seed sludge) ส่วนประกอบของน้ำเสีย ตลอดจนการเริ่มต้นขบวนการแบบไร้ออกซิเจนและสิ่งแวดล้อมที่เริ่มต้น Granular sludge อาจมีหลายชนิด ดังนี้

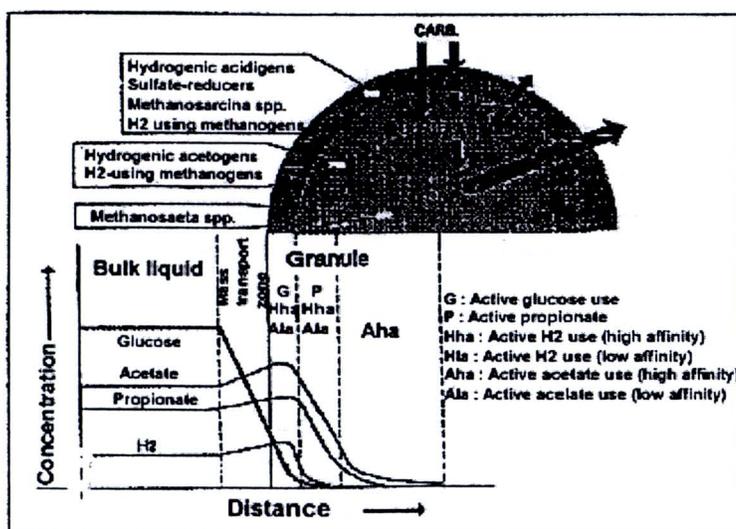
Sarcina granules เป็นชนิดที่มีจุลินทรีย์รูปร่างกลม เกาะกันเป็นกลุ่ม เป็นส่วนใหญ่ Granular ชนิดนี้สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียที่มีอะเซติกเข้มข้นมากกว่า 1,000 มก./ล. และมักมีขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 0.65 มิลลิเมตร) จึงถูกชะล้างออกได้ง่ายและยังเป็นชนิดที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูง

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

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

Rod ลักษณะเป็นรูปแท่งประกอบด้วย Methanotrix sp. ชนิดที่เป็นเส้นรวมกันประมาณ 5 เซลล์ พบในถังหมักที่บำบัดน้ำเสียโรงงานเป็งมันและ โรงงานน้ำตาล

โครงสร้างของ Granular sludge ประกอบด้วย Methanotrix aggregates rod เป็นแกนกลาง และล้อมรอบด้วย Methanotrix ที่เป็นเส้นลากล้อมรอบดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของเม็ดจุลินทรีย์ในระบบยูเอสบีบำบัดน้ำเสียกลูโคส (Guiot et al., 1992)

4.5 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดจุลินทรีย์ (Granules)

Guiot ทำการศึกษาในปี 1992 กล่าวว่า ความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ของแบคทีเรีย ที่สามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดจุลินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ดีเม็ดจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีข้อดีดังนี้คือ

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

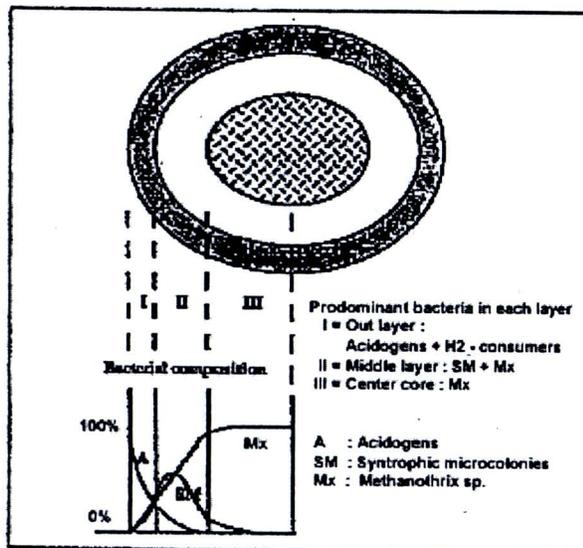
การศึกษาโครงสร้างของเม็ดจุลินทรีย์ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต ด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscopy) พบว่าโครงสร้างภายในแบ่งเป็น 3 ชั้น เช่น เม็ดจุลินทรีย์ที่พบในการทดลองซึ่งใช้น้ำตาลซูโครส พบกลุ่มแบคทีเรียแบ่งเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ดังนี้คือ

- 1) ชั้นนอก ซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียหลายกลุ่ม ได้แก่ Hydrogenic acidogens Sulfate reducers, Methanosarcina และ H_2 -utilizing methanogens
- 2) ชั้นกลาง ได้แก่ Hydrogenics acetogens และ H_2 -utilizing methanogens เช่น Methanosarcina, Methanococcales และ Methanospirillum เป็นต้น
- 3) ชั้นใน เป็นแบคทีเรียประเภท Acetoclastic ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta

แบคทีเรียกลุ่ม H_2 -utilizing methanogens ในชั้นกลางและชั้นนอกมีความแตกต่างกันคือ กลุ่มแบคทีเรียชั้นนอกมีความชอบที่จะใช้สารตั้งต้น (Substrate) ที่ต่ำกว่า (Low affinity หรือมีค่า K_s สูง) กลุ่มแบคทีเรียชั้นกลาง และแบคทีเรียกลุ่ม Acetoclastic ที่อยู่ชั้นในมี Affinity ที่สูงกว่า (ค่า K_s ต่ำ) แบคทีเรียกลุ่ม Acetoclastic ในชั้นกลาง การเกิดเม็ดจุลินทรีย์ (Granulation) เป็นโครงสร้างในลักษณะดังกล่าว ส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียแต่ละชนิด โดยเฉพาะในแกนกลางของเม็ดจุลินทรีย์ซึ่งเป็น Acetoclastic methanogens (ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta) เป็นส่วนสำคัญในการผลิตมีเทนโดยอาศัยสารตั้งต้น (Substrate) ได้แก่ อะเซเตท ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มชั้นนอกและชั้นกลาง โดยทั้งนี้ Methanosaeta เป็นแบคทีเรียที่มีค่า Affinity สูงมากที่สุด (K_s ต่ำมากที่สุด) ในกลุ่มแบคทีเรีย Acetoclastic methanogens ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของ Methanosaeta ในสถานะที่ข้อจำกัดของการแพร่กระจายอะเซเตทมายังแกนกลางของเม็ดจุลินทรีย์

อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า ไม่พบโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นของแบคทีเรียในเม็ดจุลินทรีย์ที่บำบัดน้ำเสียประเภทโพรไฟโอเนท เอทานอลและน้ำเสียประเภทที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (Non-carbohydrate) โดยเฉพาะน้ำเสียประเภทโพรไฟโอเนท พบแบคทีเรียกลุ่ม Propionate oxidizing acetogens กระจายอยู่ทั่วเม็ด จุลินทรีย์ (Fang et al., 1994)

โครงสร้างและขนาดของชั้นแบคทีเรียในแต่ละชั้นขึ้นกับอัตราการย่อยสลาย Substrates และการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดจุลินทรีย์ ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ผิววนอกสุดของเม็ดจุลินทรีย์พบวากลุ่ม Acidogens จะมีปริมาณมาก ทั้งนี้เพราะนอกเหนือไปจากความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่าสูงบริเวณรอบนอก (Bulk liquid) แล้วยังเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Acidogenesis ที่มีค่าสูงกว่า Acetogenesis และ Methanogenesis อะเซเตทที่ถูกผลิตจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลางและชั้นในของเม็ดจุลินทรีย์ต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 โครงสร้างและความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต (Fang et al., 1994)

4.6 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol et al. (1983) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยสังเกตจากพฤติกรรมในการคงอยู่หรือหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 2-8 และได้กล่าวถึงขั้นตอนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

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

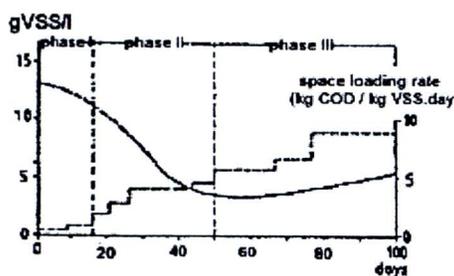
เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อได้ทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีแล้ว ชั้นตะกอนด้านล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากน้ำเสียที่ไหลผ่านชั้นตะกอน และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบรวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (Filamentous organisms) ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จับตัวได้น้อยลง

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

ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอย เนื่องมาจากการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มภาระบรทุกสารอินทรีย์ทำให้มีปริมาณก๊าซมากขึ้น ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากยังคงอยู่ในระบบ และรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่อาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งถือได้ว่าเป็นการคัดเลือกพันธุ์ของระบบ

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

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



ภาพที่ 2-8 การเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และอัตราการบรทุกอินทรีย์ระหว่างขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังยูเอเอสบี (Hulshoff Pol et al., 1983)

5. แอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี

5.1 ความเป็นมาและลักษณะของระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี

ถังกรองไร้อากาศ (anaerobic filter) ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Young และ McCarty ในปี 1969 โดยมีพื้นฐานอยู่บนงานที่พัฒนาขึ้นในช่วงเริ่มแรกของ Coulter et al. (1957) กระบวนการกรองไร้อากาศได้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอย่างมาก แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือระบบนี้จะเสียค่าใช้จ่ายของตัวกลางอย่างมากซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายไปกับโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักมากเช่นกัน ถังกรองไร้อากาศ

อากาศยานขนาดใหญ่ (full scale) มีการนำไปใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมมาก แต่กับน้ำเสียชุมชนแทบจะไม่มี การนำไปใช้

ระบบยูเอเอสบีได้มีการพัฒนาขึ้นในทศวรรษ 1970 โดยLettinga และการศึกษาที่มหาวิทยาลัย Wageningen ในประเทศเนเธอร์แลนด์ แรกเริ่มระบบนี้ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โรงบำบัดขนาดใหญ่หลายแห่งกำลังเดินระบบอยู่และหลายแห่งก็กำลังก่อสร้าง โรงบำบัดขนาดใหญ่ที่กำลังเดินระบบอยู่นั้นอยู่ในประเทศเขตร้อน ส่วนในประเทศเขตอบอุ่นระบบนี้ยังอยู่ในขั้นการทดลองเท่านั้น

ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบีเริ่มเป็นที่นิยมในระยะ 10 ปีให้หลังมานี้ไม่ได้เป็นที่นิยมเพียงแต่ในประเทศในแถบยุโรปเท่านั้น แต่ความนิยมยังมาถึงประเทศในกลุ่มเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ด้วย โดยใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามระบบก็ยังคงไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง เพราะอาจเกิดการยับยั้งการเกิดเม็ดยูเอเอสบี ทำให้กิจกรรมการผลิตก๊าซมีเทนอ่อนแอลง

ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบีจะประกอบไปด้วยชั้นของสลัดจ์ที่อยู่บริเวณชั้นล่างของถังปฏิกรณ์คล้ายกับระบบยูเอเอสบี และนอกจากนั้นยังมีชั้นของตัวกลาง (อาจใช้เป็นตัวกลางพลาสติก) ที่ทำงานคล้ายกับถังกรองไร้อากาศจางอยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ (Young and McCarty, 1969) ซึ่งโดยทั่วไปนั้น ภายในระบบในส่วนของยูเอเอสบีจะประกอบไปด้วยชีวมวลที่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีความสามารถในการตกตะกอนสูง ตลอดจนมีกิจกรรมทางชีวะ (bioactivity) สูง ในขณะที่ชั้นที่มีตัวกลางพลาสติกนั้นจะเป็นที่เจริญเติบโตของจุลชีพชนิดเกาะติดซึ่งตัวกลาง จะช่วยเก็บกักชีวมวลให้คงอยู่ภายในระบบ โดยที่ประสิทธิภาพของระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบีจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของน้ำเสียกับทั้งจุลชีพที่แขวนลอยที่อยู่ในส่วนล่าง และจุลชีพที่เกาะติดซึ่งอยู่ในส่วนบนของถังปฏิกรณ์

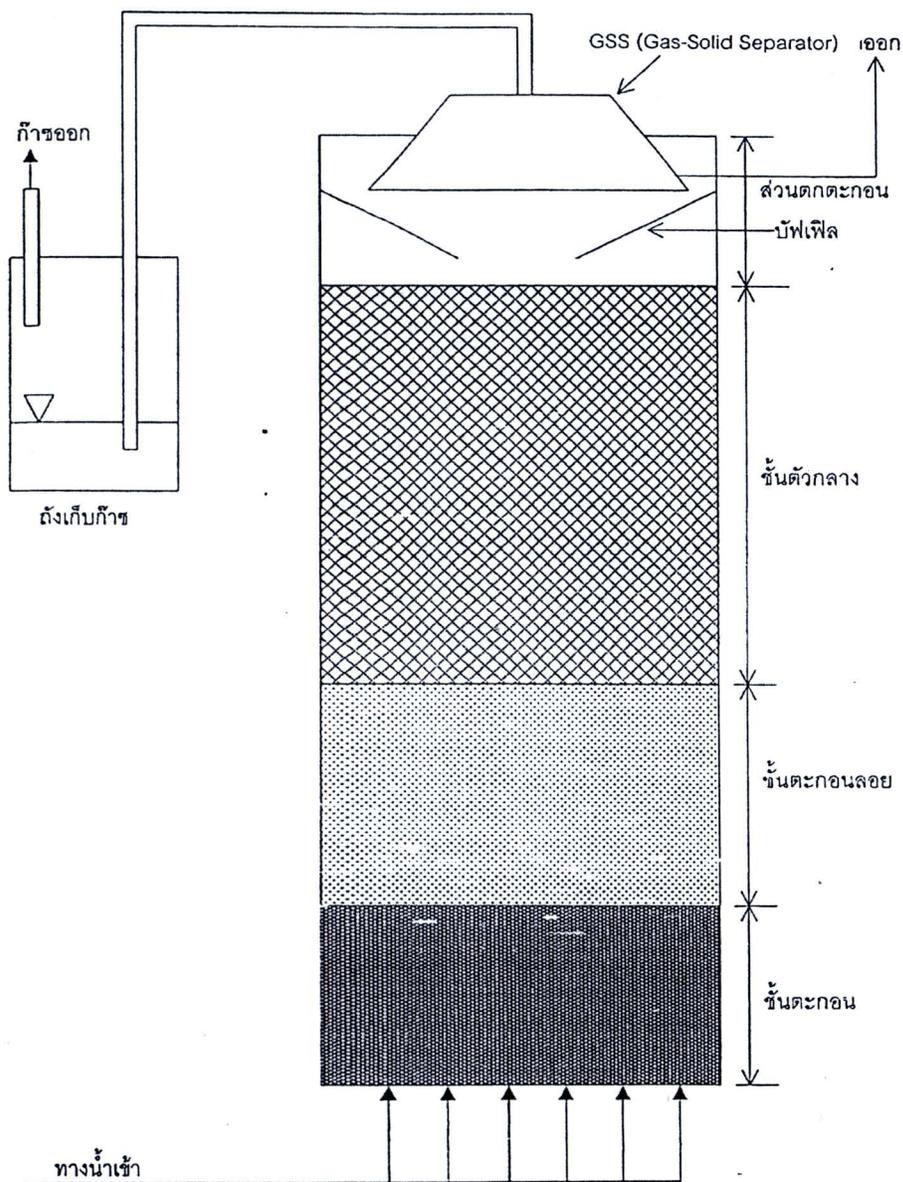
น้ำเสียจะเข้าสู่ระบบที่กั้นถังและไหลผ่านเข้าไปยังถังปฏิกรณ์ ซึ่งภายในถังจะเป็นชีวมวลเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นจุลชีพพวก hydrolytic bacteria และ fermentative bacteria ซึ่งเจริญเติบโตอยู่บริเวณชั้นล่างของถังปฏิกรณ์ โดยที่การเติบโตของสลัดจ์เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบนี้ ดังนั้นระบบจึงควรมีการสะสมของชีวมวลให้มากที่สุด

ภาพที่ 2-9 แสดงระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี พร้อมกับส่วนประกอบที่สำคัญ ส่วนประกอบที่สำคัญคือ อุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย หรือ GSS (Gas-Solid Separator) และชั้นตัวกลาง GSS จะติดตั้งอยู่ที่จุดบนสุดของถังปฏิกรณ์ คือที่โชนตกตะกอน น้ำเสียที่เข้ามาข้างถังจะต้องไหลอย่างสม่ำเสมอจากทางด้านล่างของถัง ผ่านชั้นสลัดจ์ และชั้นตัวกลางเข้าไปยังโชนตกตะกอนจนไปถึงอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย

ชั้นตัวกลางจะเป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้เม็ดยูเอเอสบีจากชั้นสลัดจ์ซึ่งอาจจะมีฟองก๊าซเกาะอยู่หลุดออกไปจากถังเพราะเมื่อมันมาชนกับชั้นตัวกลางเม็ดยูเอเอสบีขนาดใหญ่จะตกกลับลงไปยังชั้นสลัดจ์อีก แต่ก็อาจจะมีฟล็อกของจุลินทรีย์ขนาดเล็กที่อาจจะหลุดลอยออกจากชั้นตัวกลางได้ซึ่งจะถูกดักไว้โดย GSS อีกต่อหนึ่ง

ผนังด้านข้างที่เอียงของ GSS ทำให้พื้นที่การไหลของของเหลวในโชนตกตะกอนเพิ่มขึ้น เมื่อของเหลวเข้าใกล้ผิวน้ำ ความเร็วไหลขึ้นของของเหลวจะลดลงเมื่อของเหลวไหลผ่านออกไปตรงจุดที่ปล่อยน้ำออก ความเร็วของเหลวที่ลดลงทำให้ ฟล็อกของสลัดจ์ที่ไหลเข้ามายังโชนตกตะกอนสามารถรวมตัวกัน สลัดจ์ที่

รวมตัวกันมากขึ้นที่ GSS จะหนักมากขึ้นและเมื่อน้ำหนักของมันมากกว่าแรงเสียดทานที่พยุงให้มันอยู่บนผิวเอียงๆ ของ GSS ได้ มันก็จะตกลงไปในโซนย่อยสลายอีก กลายเป็นมวลส่วนหนึ่งของชั้นสลัดจ์ที่จะย่อยสลายอินทรีย์ที่เข้ามา ดังนั้นการมี GSS อยู่ที่ส่วนบนของโซนย่อยสลาย ทำให้ระบบสามารถรักษาชั้นสลัดจ์ไว้ได้ ขณะที่ของแข็งแขวนลอยบางส่วนอาจหลุดออกไปได้



ภาพที่ 2-9 ดังปฏิกรณ์แอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี (นาฏนดา ธรินทรวรคูปต์, 2536)

ฟองก๊าซจะขึ้นไปสู่ผิวของของเหลวและก๊าซซึ่งอยู่ภายใต้ GSS ผิวนี้อาจจะมีระดับเดียวกับผิวของอากาศและน้ำในโซนตกตะกอน หรืออาจจะมีระดับต่ำกว่าถ้ามีความดันของก๊าซอยู่ด้วย ฟล็อกของสลัดจ์ที่จับอยู่กับฟองก๊าซอาจจะขึ้นไปจนถึงผิวของส่วนดักก๊าซ แต่มันจะตกลงมาสู่ชั้นตัวกลางเมื่อฟองก๊าซหลุดออกไปแล้ว

5.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี

ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนพลังงานในปัจจุบัน รวมทั้งสามารถแยกเชื้อแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียสร้างมีเทน ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์ได้สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียพวกไร้ออกซิเจนได้มากขึ้น การใช้ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสีย มีข้อดีข้อเสียดังนี้

ข้อดีได้แก่

- 1) ไม่ต้องการการใช้ไฟฟ้าและไม่ต้องการเครื่องจักรกล
- 2) มีความเสถียรมากกว่าระบบ UASB ทั่วไป เนื่องจากใช้ตัวกลางในระบบ
- 3) ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าระบบ UASB ทั่วไป
- 4) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่เป็นปัญหา และการเริ่มต้นเดินระบบใหม่ก็กระทำได้ง่าย ระบบสามารถฟื้นตัวได้รวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู
- 5) เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง
- 6) เหมาะสำหรับย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ
- 7) ไม่ต้องทำการหมุนเวียนตะกอน

ข้อเสียได้แก่

- 1) ระบบต้องการการดูแลและควบคุมอย่างใกล้ชิดเพราะความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มจุลชีพ

หลักไม่คงที่

- 2) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลชีพค่อนข้างต่ำ ทำให้การตอบรับการเปลี่ยนแปลงของระบบช้า
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์บางอย่างด้านการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จึงจำกัดการใช้ระบบและโดยทั่วไปน้ำที่ออกจากระบบจะมีสารอินทรีย์ละลายที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้มากพอ ทำให้ไม่สามารถทิ้งโดยตรงได้
- 4) ระบบอาจจะเกิดการอุดตันภายในตัวกลางได้เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน

6. การแยกการเกิดปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน (Two-Stage Process)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ ไฮโดรไลซิส การสร้างกรดอินทรีย์ และการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนนั้นต่ำกว่าในอีก 2 ขั้นตอน ดังนั้นอัตราการเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป จึงขึ้นกับขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (แต่ในกรณีของน้ำเสียที่มีสารประกอบพวกเซลลูโลสสูง พบว่าขั้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย) โดยทั่วไป ในระบบบำบัดแบบดั้งเดิมและแบบประสิทธิภาพสูง มักใช้ถังหมักเพียงถังเดียว ซึ่งปฏิกิริยาชีวเคมีทั้งสามขั้นตอนนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ในถังหมักที่มีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสมกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่ำกว่าแบคทีเรียในกลุ่มอื่นอีกทั้งยังมีอัตราการเติบโตที่ต่ำกว่า เป็นผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบหมักแบบสองขั้นตอนนี้

หลักการการทำงานของระบบ คือใช้ถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกัน โดยมีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้ในถังหมักแรก เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิส และการสร้างกรดอินทรีย์ ส่วนในถังหมักที่สอง เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสม และอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนแตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ถังหมักสองถังทำให้สามารถควบคุมสภาวะและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้ (Sumaeth, 1988)

6.1 ข้อดีข้อเสียของระบบหมักแบบสองขั้นตอน

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

6.2 เทคนิคในการแยกออกเป็นสองขั้นตอน

จุดประสงค์ในการแยกออกเป็นกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ และกลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน เพื่อมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทนในปริมาณที่พอเหมาะในถังหมักแต่ละถัง เพื่อให้อัตราการสร้างกรดและการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยการควบคุมถังหมักแต่ละถังแยกจากกัน อย่างไรก็ตามในถังหมักกรดก็ยังมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอยู่และในทางกลับกันในถังหมักมีเทน ยังคงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดร่วมอยู่ด้วย แต่มิได้เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนตามลำดับ

การแยกออกเป็นสองขั้นตอนสามารถทำได้โดย (Ghosh, Conrad and Klass, 1975)

- ใช้เยื่อไดอะไลซิส (Dialysis membrane) ซึ่งจะเลือกให้เฉพาะแบคทีเรียบางชนิดเท่านั้นที่ผ่านเยื่อไปได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและเยื่อที่ใช้มีราคาแพงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้
- ใช้ตัวยับยั้งที่เหมาะสม สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ตัวยับยั้งได้แก่ ออกซิเจน, ไนเตรต, ซัลเฟต หรือ โลหะ แต่เนื่องจากการหาตัวยับยั้งและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมนั้นทำได้ยาก จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เช่นกัน
- ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูงๆ ซึ่งจะให้มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูง มีผลในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักกรดโดยตรง
- การควบคุมทางจลนพลศาสตร์ (kinetic control) เป็นการควบคุมการทำงานของถังหมักที่อัตราการเจือจาง (dilution rate) และอัตราส่วนการรีไซเคิล (recycle ratio) ซึ่งมักจะใช้อัตราการเจือจางในถังหมัก

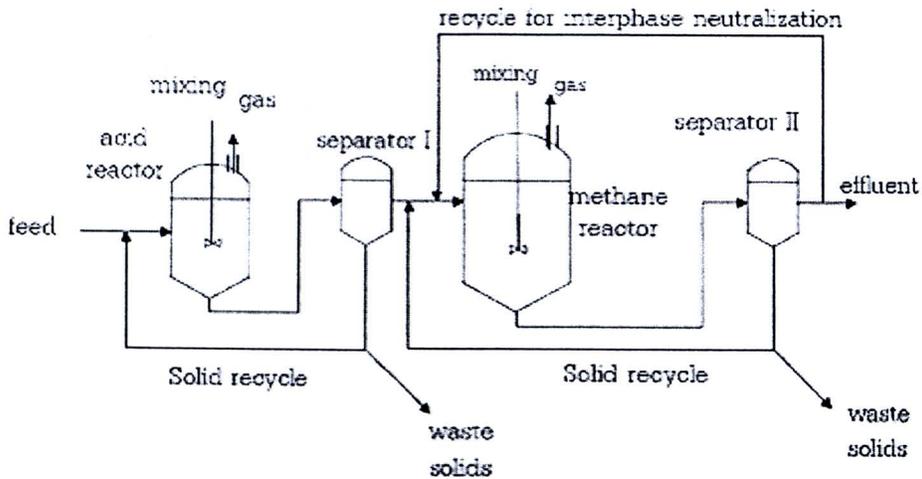
กรดสูง (หรือใช้ระยะเวลาเก็บน้ำเสียในถังหมักต่ำ) เพื่อให้ในถังหมักกรดมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ยาวนานกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและมีการนำเอาตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักแต่ละถังกลับไปใช้อีก เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในถังหมัก

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

6.3 ลักษณะการทำงานของระบบ

เนื่องจากความแตกต่างในลักษณะการเติบโต อาหารที่ต้องการ และสภาวะในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน จึงทำให้ต้องมีการแยกการย่อยสลายออกเป็น 2 ขั้นตอน ในระบบประกอบด้วย ถังหมักจำนวน 2 ถังต่อเนื่องกัน โดยในแต่ละถังหมักจะมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม เพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยในถังหมักแรก หรือถังหมักกรด จะควบคุมสภาวะให้เหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด เกิดการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ ได้กรดไขมันระเหย (VFA) เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนในถังหมักสอง หรือถังหมักมีเทน (มีขนาดใหญ่กว่าถังหมักกรด) มีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยใช้กรดไขมันระเหยจากถังหมักกรดเป็นอาหารของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วย มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ตะกอนแบคทีเรียที่ออกจากถังหมักแต่ละถัง จะถูกนำกลับมาใช้ในถังหมักอีก เช่นเดียวกับใน Contact Process ขนาดของถังหมักและอัตราส่วนการรีไซเคิลสำหรับแต่ละขั้นตอนขึ้นกับจลนพลศาสตร์ ในการเติบโต (growth rate) ของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ภาพที่ 8.14 แสดงรูปแบบระบบหมักแบบสองขั้นตอน

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



ภาพที่ 2-10 ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนชนิดสองขั้นตอน (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นาฏนดา ธรินทรวรกุล (2537) ศึกษากระบวนการตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบี แบบอุณหภูมิต่ำ (55 องศาเซลเซียส) ที่ทำการศึกษาเป็นการนำเทคนิคการบำบัดน้ำเสียถึง 3 ส่วนมาผสมผสานกัน คือ ระบบสองขั้นตอน, ระบบหมักประสิทธิภาพสูง และการควบคุมที่อุณหภูมิต่ำ (55 องศาเซลเซียส) โดยทำการทดลองกับน้ำเสียที่มี COD ประมาณ 90,000-120,000 มก./ล. โดยถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกัน คือ เป็นแบบตัวกลางกรอง และแบบยูเอเอสบี โดยควบคุมอุณหภูมิต่ำหมักทั้งสองถังที่ 55 องศาเซลเซียส พบว่าระบบที่มีเสถียรภาพสูง สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 10.96 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักนี้คือ 6.38-10.02 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 0.13 ลบ.ม./กก.ซีโอดี ที่ป้อนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

เนตรนภา สรุตราพงศ์ (2539) ได้ศึกษาการใช้ยูเอเอสบีแบบมีถังสร้างกรด ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แอมโมเนียสูง โดยมีการทดลอง 3 ชุด คือชุดที่ 1 ไม่มีถังสร้างกรด ชุดที่ 2 มีถังสร้างกรดและมีการหมุนเวียนน้ำกลับ ชุดที่ 3 ที่ถังสร้างกรดแต่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ ทดลองที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ของระบบยูเอเอสบี 1, 2 และ 3 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 81, 89 และ 84 % ตามลำดับ ผลการทดลองที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ของระบบยูเอเอสบี 1, 2 และ 3 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 73, 85 และ 81 % ตามลำดับ การใช้ระบบยูเอเอสบีแบบมีถังสร้างกรดมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าระบบยูเอเอสบีที่ไม่มีถังสร้างกรด ขณะที่ผลของการหมุนเวียนน้ำกลับมาที่ระบบยูเอเอสบีไม่ชัดเจนกล่าวคือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานจากระบบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เบญจพร สุราษฎร์ (2541) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนชนิดลูกผสม โดยใช้ถังปฏิกรณ์ 6 ลิตร จำนวน 3 ถัง ในการบำบัดน้ำเสียแอมโมเนีย มีความหนาแน่นตัวกลางในบริเวณ packed bed 33, 22 และ 11 กก./ลบ.ม. มี HRT 5.4 วัน ใช้ภาระบรรทุกอินทรีย์จาก 0.5 ถึง 4.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าที่ 4.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีถังปฏิกรณ์ถึง 3 ใบ คือ ร้อยละ 87, 84 และ 70 การผลิตก๊าซมีเทนเป็น 0.18, 0.17 และ 0.09 ลบ.ม./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด มีการสะสมของ

กรดอินทรีย์เป็น 750, 890 และ 1890 มก./ล. และมีปริมาณชีวมวลเป็น 67.3, 57.5 และ 42.3 กรัม ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ทำการทดลองนานขึ้น โดยภาระบรรทุกอินทรีย์คั่งที่ 4 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน และลด HRT ลงเหลือ 3 วัน พบว่าปริมาณชีวมวลในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 เพื่อขึ้นเป็น 72.5 และ 63.0 กรัม แต่ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีในถังที่ 1 และ 2 ลดลงเหลือร้อยละ 74 และ 62 และมีการสะสมของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 1610 และ มก./ล.

Guiot and Van den Berg (1984) ได้ทำการค้นคว้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก ไฮบริดยูเอสบี โดยใช้ถังหมักขนาด 4.25 ลิตร (เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9.6 ซม. ความสูงของของเหลว 62 ซม.) ปริมาตร 1/3 ด้านบน เติมตัวกรองกลางกรอง (filter media) ทำด้วยวงแหวนพลาสติกแบบส้อมให้ลอยอยู่บนแผ่นตะแกรง และเวียนน้ำเสียกลับ (recycle) ประมาณ 5.4 เท่าของอัตราป้อนน้ำเสีย ทำการทดลองที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 5 ถึง 51 กก.ชีโอดี/ม³. วัน ด้วยน้ำเสียที่ทำจากน้ำตาลสังเคราะห์ที่มีค่าชีโอดี 2,500 มก./ล. อัตรากำจัดค่าชีโอดีสูงสุด 96% ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 5 ถึง 25 กก. ชีโอดี/ม³. วัน เวลาเก็บกัก (HRT) เท่ากับ 13 ถึง 26 ชม. และได้ศึกษาการกวนผสมด้วย Tritium tracer ปรากฏว่า สมบูรณ์ทั่วทั้งถังอุณหภูมิในการหมัก 27°C

Guiot and Vanden Berg (1985) ทดลองเพิ่มเติมโดยใช้ถังหมักแบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบีขนาดเติมน้ำเสียที่ใช้ในการป้อนและอัตราป้อนอินทรีย์ สภาวะการทดลองเหมือนเดิม โดยพบว่า ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่า 25 กก. ชีโอดี/ม³. วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีจะไม่ขึ้นกับค่า VSS แต่ถ้าอัตราป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 25 กรัม ชีโอดี/ม³. วัน ที่ VSS 20.2 กรัม/ลิตร อัตรากำจัดชีโอดีมีค่าคงที่ไม่เพิ่มตามอัตราป้อนสารอินทรีย์ แต่ที่ VSS 28.5 กรัม/ลิตร อัตรากำจัดชีโอดีจะเพิ่มตามอัตราป้อนสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังสรุปผลของสารอินทรีย์กับ VSS ที่มีประสิทธิภาพกำจัดชีโอดีเท่ากับ 96% ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 5 ถึง 25 กรัมชีโอดี/ลิตร.วัน 63% ที่ 36 กรัมชีโอดี/ลิตร.วัน ที่ VSS 20.2 กรัม VSS / ลิตร ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 51 กรัมชีโอดี/ลิตร.วัน ประสิทธิภาพกำจัดชีโอดี 64% VSS 28.5 กรัม VSS / ลิตร

Guiot et al. (1986) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระบบยูเอสบีกับระบบแอนแอโรบิก ไฮบริดยูเอสบี โดยใช้ น้ำเสียที่ค่าชีโอดีหลายความเข้มข้น (10.6 5.6 2.6 กรัมชีโอดี / 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 ชีโอดี/ลิตร.วัน ในช่วงแรกประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของระบบยูเอสบี 95% ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี 96% ในช่วงที่สองประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของระบบยูเอสบี 87% ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี 96% ในช่วงที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของยูเอสบี 83% ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอสบี ยังคงที่ตลอดคือ 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

Tanaka and Mutsuo (1986) ทำการทดลองระบบหมักสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย โดยค่า COD ที่ใช้ทดลองอยู่ประมาณ 1,500 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 37°C โดยใช้ถังกวน ขนาดความจุ 4.5 ลิตร เป็นถังหมักกรดและถัง

หมักแบบตัวกลางกรอง ขนาดความจุ 15 ลิตร ภายในบรรจุตัวกรองแบบพลาสติก เป็นถังหมักมีเทน มีการควบคุมระยะเวลาพักเก็บน้ำเสียในถังหมักกรดให้ได้ 1.0 วัน ผลการทดลองพบว่า สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ถึง 93% ที่ระยะเวลาพักเก็บในระบบ 4.4 วัน ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ทั้งหมด 530 มล./ลิตรของสิ่งป้อน สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้เท่ากับ 80% ค่า pH ของระบบอยู่ในช่วง 6.8-7.5 นอกจากนี้ระบบยังสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันได้สูงถึง 3 เท่า โดยทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเทียบกับระบบบำบัดแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้ถังหมักขนาดความจุ 15 ลิตร ที่ระยะเวลาพักเก็บ 7.6 วัน พบว่าระบบแบบขั้นตอนเดียวต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนานกว่าที่จะให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซได้ใกล้เคียงกับในระบบแบบสองขั้นตอน และยังพบอีกว่าระบบแบบสองขั้นตอนนี้มีเสถียรภาพดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากกรวยแยกออกเป็น 2 ขั้นตอนช่วยลดผลของกรดไขมันโมเลกุลใหญ่ที่มีต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลงได้

Fang Herbert H.P (1998) ได้ศึกษาความสามารถในการของรับค่าซีโอดีที่มากที่สุดของระบบยูเอเอสบี ขนาด 8.5 ลิตร สามารถรับได้ที่อุณหภูมิ 37 องศา โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นสูง 6,000 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาในการกักน้ำ 1.8 – 10 ชั่วโมง โดยใช้ภาระบรรทุกซีโอดี 18-260 กรัมซีโอดี/ลิตร.วัน พบว่าระบบสามารถกำจัดซีโอดีที่ละลายน้ำได้ 94 – 98 % และกำจัดซีโอดีทั้งหมดได้ 70 – 90%

Sharma and Singh (2001) ได้ศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารเล็กน้อย (Trace Nutrients) ต่อการเกิดตะกอนเม็ดในระบบไฮบริด พบว่าการเติมนิเกิลและ โคบอลต์ ช่วยให้เกิดตะกอนได้ดีขึ้น ส่วนการเติมแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้การเกิดตะกอนแย่งลง