บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวความคิด

3.1 จุลชีวะและชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจน

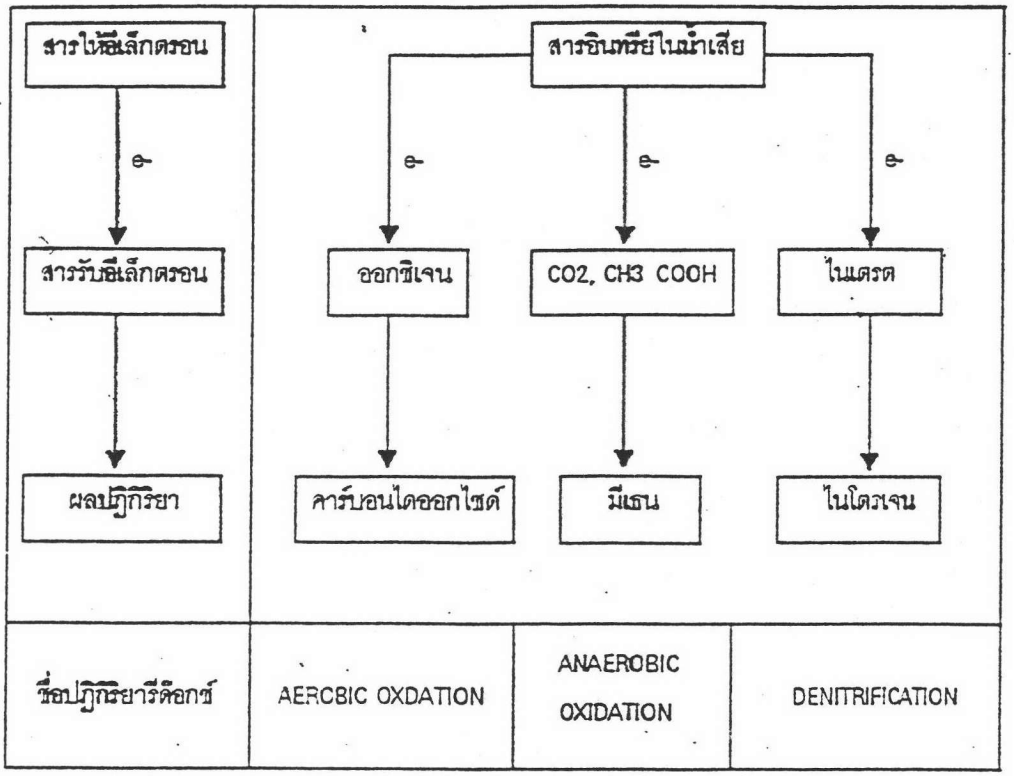
การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีออกซิเจน ปฏิกิริยาบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นแบบใช้ออกซิเจน หรือไม่ใช้ออกซิเจน ล้วนมีกลไกพื้นฐานร่วมกัน กล่าวคือทั้งคู่เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชั่น-รีดักชั่น หรือปฏิกิริยารีด็อกซ์ ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเลคตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้และสารรับอิเลคตรอน โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเลคตรอน และสารอย่างอื่นที่อยู่ในน้ำจะเป็นสารรับอิเลคตรอน สำหรับปฏิกิริยาใช้และไร้ออกซิเจน ความแตกต่างจะอยู่ที่ประเภทของสารรับอีเลคตรอน โดยปฏิกิริยาใช้ออกซิเจน สารรับอิเลคตรอนก็คือออกซิเจน ส่วนถ้าสารรับอิเลคตรอนเป็นสารอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาก็เป็นแบบไร้ออกซิเจน (ภาพที่ 3.1)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน มีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน คือ

- ไม่มีออกซิเจนอิสระซึ่งเป็นสารรับอิเลคตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง
- ได้ผลสุดท้ายของปฏิกิริยาคือ ก๊าซมีเทน
- มีอัตราการสร้างตะกอนจุลินทรีย์ต่ำมาก
- มีเสถียรภาพต่ำ
- ไม่อาจลดความเข้มข้นสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมาก
- ต้องการไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำ

นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของกระบวนการมีลักษณะเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนลักษณะเฉพาะตัวเหล่านี้มีผลเนื่องมาจากลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการไร้ออกซิเจน แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน



ภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยารีด๊อกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มั่นสิน, 2536)

ดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation (or hydrolysis)

ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis of Short-chain fatty acid

ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

ซึ่งทั้ง 4 ขั้นตอนจะเกี่ยวข้องกับกลุ่มจุลินทรีย์ 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 : Acidogenic Bacteria

กลุ่มที่ 2 : Acetogenic Bacteria

กลุ่มที่ 3 : Methanogenic Bacteria

3.1.1 ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation (or hydrolysis)

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ และซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน จะถูกทำให้มีโมเลกุลเล็กลง และละลายน้ำได้ภายนอกเซลล์ โดยเอนไซม์ (Extracellular Enzyme) ที่ถูกปล่อยออกมาโดยแบคทีเรียจำพวก Acidogenic โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมันจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมัน (long-chain fatty acid)

การย่อยสลายในขั้นตอนนี้ค่อนข้างช้า ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น พีเอช เวลากักเซลล์ (cell residence time) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของสาร สารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ๆ และมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ จะใช้เวลาในการย่อยสลาย นานกว่าสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กๆ จากเหตุผลดังกล่าวนี้ ทำให้การย่อยแป้ง, โปรตีน และ เซลลูโลส ใช้เวลาแตกต่างกัน

3.1.2 ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis

โมเลกุลของสารอินทรีย์จากขั้นตอนที่ 1 ได้แก่ กรดอะมิโน, น้ำตาล และ กรดไขมัน จะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานของแบคทีเรียพวก Acidogenic

organisms โดยผ่านกระบวนการหมัก(Fermentation) ภายในเซลล์และถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหย(Volatile Fatty Acids) เช่น กรดอะซิติก(acetic acid) กรดโพรพิออนิก (propionic acid) กรดบิวทิริก (butyric acid) และ คาร์บอนไดออกไซด์

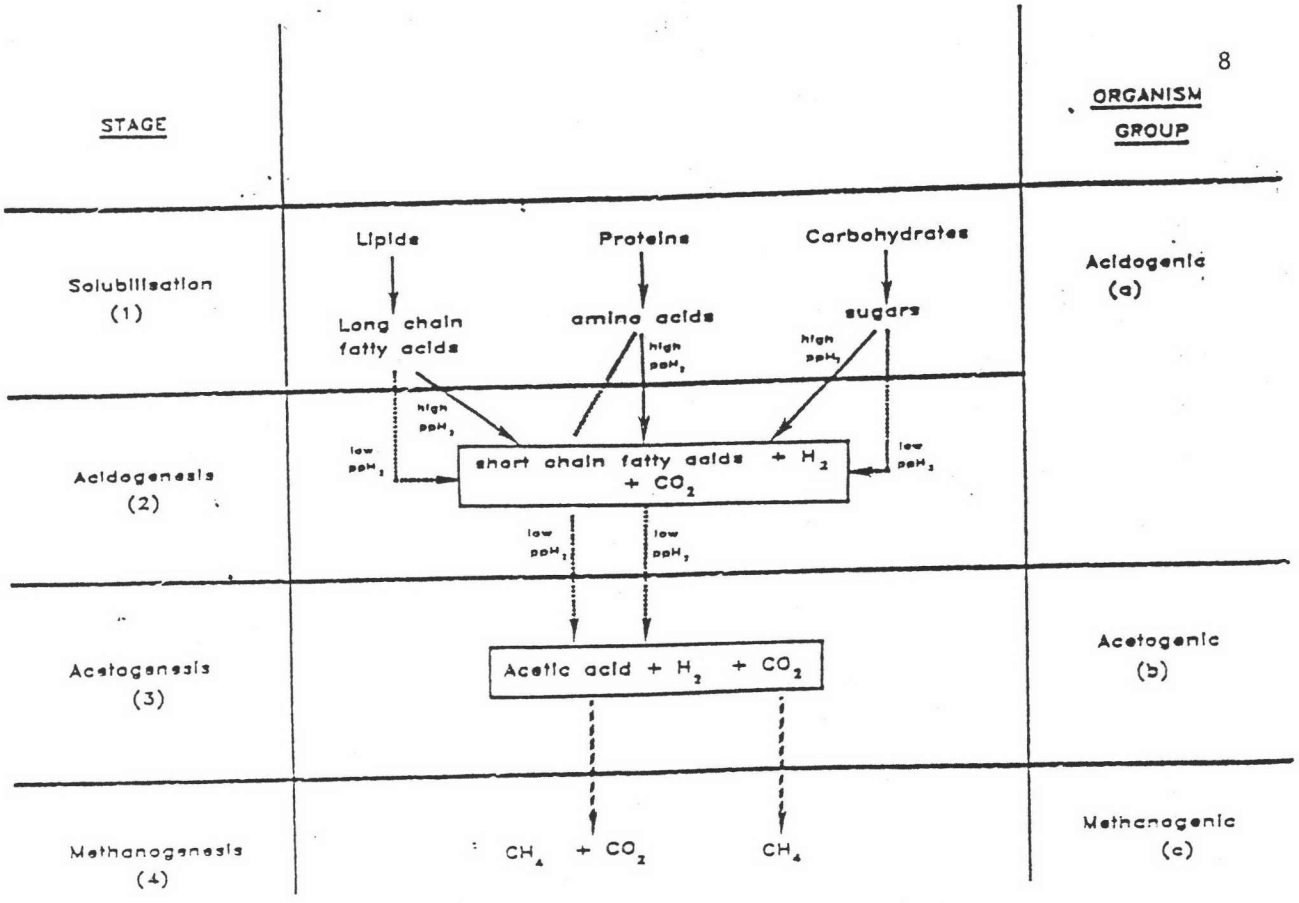
ผลสุดท้ายของขั้นตอนที่ 2 ที่ได้จากการหมัก(Fermentation) จะเป็นสารอะไร ขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารที่ผ่านจากขั้นตอนที่ 1 และ hydrogen partial pressure(pH_2) ตัวอย่างเช่น การย่อยสลายกลูโคสโดยผ่านขบวนการย่อยสลายที่เรียกว่า Embden-Meyerhof Pathway ได้กรดอะซิติก ,ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ low hydrogen partial pressure หรือได้กรดอะซิติก ,กรดโพรพิออนิก (propionic acid) คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายใต้ high hydrogen partial pressure (ภาพที่ 3.3) ภาพที่ 3.4 และ 3.5 แสดงรายละเอียดของวิถีทางของกลูโคส ภายใต้ low และ high hydrogen partial pressure ภายใต้วิถีทางดังกล่าว ทั้ง 2 แบบ กลูโคสจะถูกย่อยสลายเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก และกรดไขมันระเหยอื่นๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวรับอิเลคตรอน (ภายใต้สภาวะ low และ high hydrogen partial pressure)

3.1.3 ขั้นตอนที่ 3 : <u>Acetogenesis from Short-chain fatty acid</u>

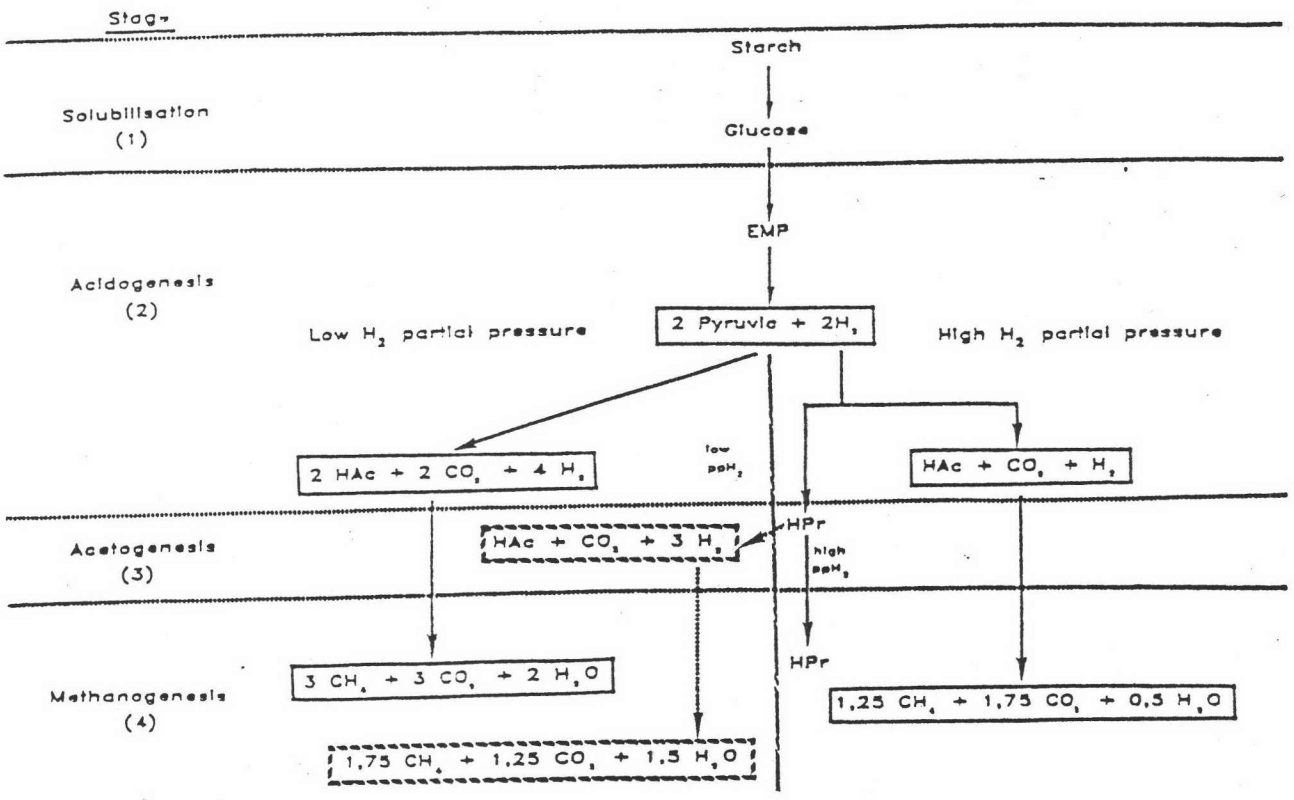
เนื่องจาก Methanogenic organisms สามารถผลิตมีเทน จากกรดฟอร์มิค(formic acid) กรดอะซิติก ไฮโดรเจน เมธานอล(methanol) และเมธิลลามิน (methylamines) แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมเช่น กรดบิวทีริค กรดโพรพิออนิก เป็นสารอาหาร (substrate) ในการผลิตมีเทนได้ แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (hydrogen-producing acetogenic bacteria) สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 (C_2) ไปเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนได้ ภายใต้สภาวะ low hydrogen partial pressure ดังสมการ

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

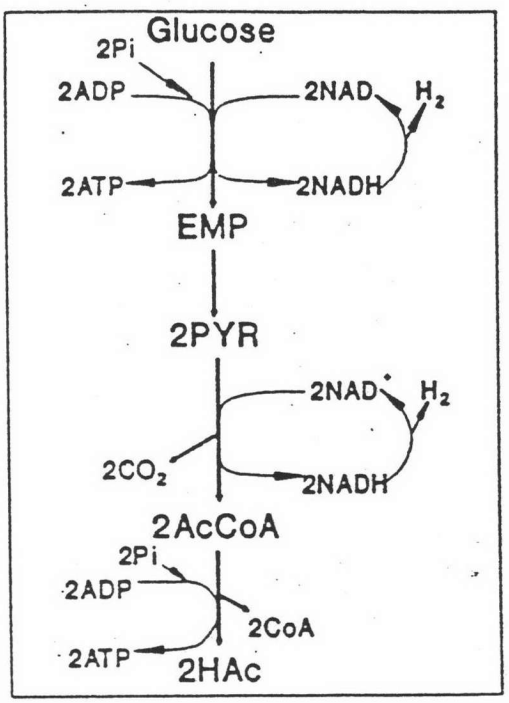
$$CH_3CH_2CH_2COOH \text{ (butyric acid)} + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$$



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง (PALNS Sam-Soon, 1987)



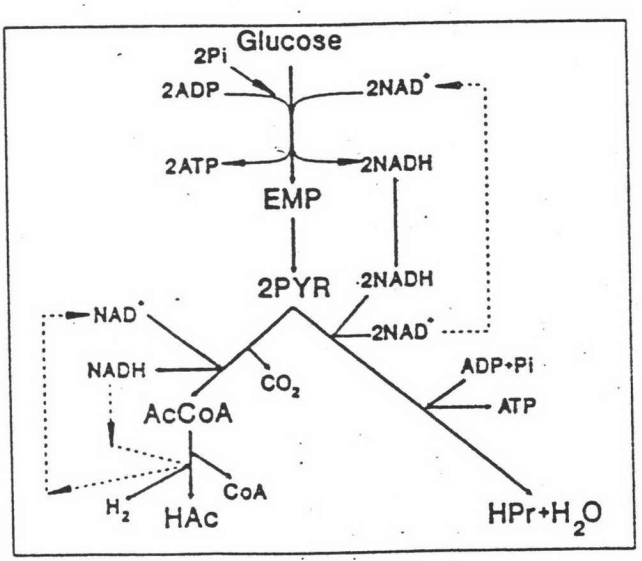
ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการย่อยสลายแป้ง ภายใต้สภาวะ High และ Low H_2 partial pressure (PALNS Sam-Soon, 1987)



ภาพที่ 3.4 ปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคส ภายใต้สภาวะ Low H_2 partial pressure โดยวิถีทาง EMP

(EMP - Embden-Meyerhof pathway ; PYR - pyruvic acid AcCoA - acetyl coenzyme A ; HAC - acetic acid)

(PALNS Sam-Soon,1987)



ภาพที่ 3.5 ปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคส ภายใต้สภาวะ High H_2 partial pressure โดยวิถีทาง EMP

(EMP - Embden-Meyerhof pathway ; PYR - pyruvic acid AcCoA - acetyl coenzyme A ; HPr - propionic acid HAc - acetic acid) (PALNS Sam-Soon,1987)

3.1.4 ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

ในขั้นตอนนี้ ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จากกรดอะซิติก(Acetoclastic Methane Bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จากไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (H_2-Utilizing Methane Bacteria) แบคทีเรียเหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชแคบๆ เท่านั้น (ประมาณ 6.7-7.2) อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตอยู่ในช่วง30-35°ซ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้า ดังนั้นจึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (rate-limiting step of anaerobic)

- The Acetoclastic Methane Bacteria

$$CH_3COOH \Rightarrow CH_4 + CO_2$$

เป็นปฏิกิริยาที่มีส่วนสำคัญในการสร้างมีเทนซึ่งจะผลิตมีเทนในระบบถึง 70% ของมีเทนที่ได้ทั้งหมด และเกิดขึ้นช้าใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน (minimum doubling time)

- The Hydrogen-Utilizing Methane Bacteria

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

ปฏิกิริยานี้เกิดค่อนข้างเร็วใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง (minimum doubling time) และเป็นการเคลื่อนย้ายก๊าซไฮโดรเจนในระบบออกจากระบบ

ไฮโดรเจนจะเป็นตัวควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลง กรดบิวทิริก และกรดโพรพิออนิกไปเป็นกรดอะซิติก ซึ่งจะควบคุมการทำงานของ acidogenic bacteria มีส่วนสำคัญในการเริ่มดำเนินการระบบ(start-up) และการรับภาระบรรทุกมากเกินไป (over load) ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

3.2 ตัวอย่างวิถีชีวเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) จากกลูโคส ภายใต้วิถีชีวเคมีแบบ EMP (Embden Meyerhof Pathway)

แบ่งขั้นตอนดังกล่าวออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนแรก ภายใต้วิถีชีวเคมีแบบ EMP กลูโคส จะถูกออกซิไดส์กลายเป็นกรดไพรูวิก ดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 + 2NAD^+ + 2ADP + 2P \longrightarrow 2CH_3COCOOH + 2NADH + 2ATP \quad (1)$$

โดยแต่ละโมเลกุลของกลูโคส จะผลิตกรดไพรูวิก 2 โมล และ ATP 2 โมล โดยมีโคเอนไซม์ NAD^+ เป็นพาหนะของอีเลคตรอน และไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH และเนื่องจากปริมาณ NAD^+ มีจำกัด จึงต้องมีวิธีปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ให้เป็น NAD^+ เพื่อให้เป็นพาหนะสำหรับขนส่งอีเลคตรอนต่อไป โดยปกติการปลดปล่อย H^+ จาก NADH ให้เป็น NAD^+ จะเกิดขึ้นดังสมการ $2NADH \longrightarrow 2NAD^+ + 2H_2$ ...(2)

สมการที่ 2 จะเกิดขึ้นได้ตราบเท่าที่ H_2 สามารถหนีออกจากระบบได้ ดังนั้นสมการที่ 2 จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ Hydrogen partial pressure มีค่าต่ำ(น้อยกว่า 10^{-6} บรรยากาศ, PALNS Sam-Soon และผู้ร่วมงาน, 1987)

ขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนกรดไพรูวิก จากขั้นตอนแรก ให้เป็นกรดไขมันระเหยซึ่งจะได้กรดไขมันระเหยชนิดใดขึ้นอยู่กับค่า Hydrogen partial pressure ดังนี้

กรณี Low hydrogen partial pressure กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นอะแซทิลโคเอ (CH_3CoA) ดังสมการ

$$2CH_3COCOOH + 2NAD^+ \longrightarrow 2CH_3CoA + 2CO_2 + 2NADH \quad ...(3)$$

โดยมี NAD^+ เป็นพาหนะของอีเลคตรอน โดยได้ NAD^+ จากการปลดปล่อย H^+ จากสมการ(2) และ CH_3CoA จะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นกรดอะซิติก พร้อมกับการสร้าง ATP ดังสมการ

$$2CH_3CoA + 2ADP + 2P \longrightarrow 2CH_3COOH + 2ATP \quad ...(4)$$

เมื่อรวมสมการ (1), (2), (3) และ (4) เข้าด้วยกัน จะได้ปฏิกิริยาการหมัก (Fermentation) ที่สมบูรณ์ ภายใต้สภาวะ low hydrogen partial pressure ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O + 4ADP + 4P \longrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2 + 4ATP \quad ...(5)$$

จากสมการที่ (5) พบว่าการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกลูโคส 1 โมล ภายใต้สภาวะ low hydrogen pressure จะได้กรดอะซิติก 2 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมล ไฮโดรเจน 4 โมล และ ATP 4 โมล

และถ้าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย H_2 - Utilizing Bacteria สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ในการผลิตมีเทน ดังสมการ

$$4H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \quad ...(6)$$

ซึ่งจากสมการที่ (6) จะทำให้ Hydrogen partial pressure มีค่าต่ำเสมอ

<u>กรณี</u> High hydrogen partial pressure

แต่อย่างไรก็ตาม หาก H_2 - Utilizing bacteria ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือไม่มี แบคทีเรียชนิดดังกล่าวอยู่ในระบบ ทำให้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสะสมอยู่ในระบบ จนทำให้ hydrogen partial pressure มีค่าสูงทำให้ NADH ไม่สามารถปลดปล่อย H^+ ตามสมการ (2) ได้ เนื่องจาก H_2 ไม่สามารถหนีไปจากปฏิกิริยาได้ แบคทีเรียชนิดไม่สร้างมีเทนจึงต้องหาวิธีการฟื้นอำนาจของ NADH วิธีอื่นเพื่อให้ปฏิกิริยาการหมักสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยการใช้วิธีการสร้างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองได้ และใช้เป็นปฏิกิริยาควบคู่ในการเปลี่ยน NADH ให้เป็น NAD^+ และพบว่าการเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้เป็นกรดโพรพิออนิก สามารถทำให้ NADH

ปลดปล่อย H^+ ได้ ดังสมการ

$$CH_3COCOOH + 2NADH + ADP + P \longrightarrow CH_3CH_2COOH + 2NAD^+ + ATP + H_2O \quad ...(7)$$

จะเห็นว่ากรดไพรูวิก 1 โมล ใช้ปลดปล่อย NADH ได้ 2 โมล แต่ยังมีกรดไพรูวิกเหลืออยู่อีก 1 โมล ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น CH_3CoA ตามปกติ ดังสมการ

$$CH_3\ COCOOH + NAD^+ \longrightarrow CH_3CoA + CO_2 + NADH \quad ...(8)$$

และพบว่า เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ก็จะเกิดปัญหาในการฟื้นอำนาจให้แก่ NADH เช่นเดิม ถ้า hydrogen partial pressure ต่ำการฟื้นอำนาจก็จะเป็นไปตามปกติ แต่ถ้า hydrogen partial pressure สูง การฟื้นอำนาจของ NADH ก็จะควบคู่ไปกับการเปลี่ยน CH_3CoA ไปเป็นกรดอะซิติก ดังสมการ

$$CH_3CoA + NADH \longrightarrow CH_3COOH + H_2 + NAD^+ \quad ...(9)$$

เมื่อรวมสมการ (1), (7), (8), (9) เข้าด้วยกันจะได้ปฏิกิริยาการหมักที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะ high hydrogen partial pressure ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 3ADP + 3P \longrightarrow CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + CO_2 + H_2 + 3ATP \quad ...(10)$$

นั่นคือ การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ของกลูโคส 1 โมล ภายใต้สภาวะ high hydrogen partial pressure จะได้กรดโพรพิออนิก 1 โมล กรดอะซิติก 1 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ไฮโดรเจน 1 โมล และ ATP 3 โมล

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (5), (10) ในขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenic) จะ

เห็นว่าการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ภายใต้ low H_2 partial pressure จะให้ ATP 4 โมล และผลิตกรดอะซิติก 2 โมล ในขณะที่ในสภาวะ high H_2 partial pressure จะให้ ATP เพียง 3 โมล และผลิตกรดอะซิติก และกรดโพรพิออนิก อย่างละ 1 โมล

3.3 <u>บทบาทของไฮโดรเจนที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน</u>

ขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จะมีการผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นตลอดเวลา

ไฮโดรเจนเกิดจากปฏิกิริยาการปลดปล่อย H^+ ของ NADH ดังสมการ

$$2NADH \longrightarrow 2NAD^+ + 2H_2 \qquad \ldots(2)$$

ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นการฟื้นอำนาจของ NAD^+ เพื่อใช้เป็นพาหนะของอีเล็คตรอนในปฏิกิริยารีดักชั่น

$$NAD^+ + e^- + H^+ \longrightarrow NADH \qquad \ldots(11)$$

ภายใต้สภาวะ low hydrogen partial pressure สมการที่ (2) จะเกิดขึ้นได้โดย H_2 จะสามารถหนีจากน้ำสู่บรรยากาศภายในถังย่อย ทำให้ปฏิกิริยา (2) สามารถเกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาได้ตลอดเวลา หากกระบวนการไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ผลิตมีเทนโดย H_2 - Utilizing Bacteria ดังสมการ

$$4H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \qquad \ldots(6)$$

การสะสมตัวของไฮโดรเจนจึงไม่เกิดขึ้น hydrogen partial pressure จึงมีค่าต่ำตลอดเวลา

แต่ถ้าการทำลายไฮโดรเจนไม่มีประสิทธิภาพ หรือไม่เกิดขึ้น ทำให้ไฮโดรเจนที่เกิด

ขึ้นสะสมตัวขึ้นหากถึงจุดอิ่มตัว ทำให้ hydrogen partial pressure มีค่าสูงขึ้นสภาพเช่นนี้ จะมีผลกระทบต่อกระบวนการไร้ออกซิเจน 2 ประการคือ

3.3.1 ผลกระทบต่อการสร้างกรดไขมันระเหย

กล่าวคือ เมื่อไฮโดรเจนละลายน้ำมากจนเกิด high hydrogen partial pressure ทำให้ปฏิกิริยา (2) ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ แบคทีเรียชนิดไม่สร้างมีเทน จึงต้องหาวิธีในการปลดปล่อย H^+ จาก NADH ให้กลับคืนเป็น NAD^+ ให้ และพบว่าการปลดปล่อย H^+ ของ NADH สามารถเกิดควบคู่กับปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไพรูวิก ไปเป็นกรดโพรพิออนิก ดังสมการ

$$CH_3COCOOH + 2NADH + ADP + P \longrightarrow CH_3CH_2COOH + 2NAD^+ + ATP + H_2O \quad ...(7)$$

ปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดขึ้นได้ที่สภาวะ high hydrogen partial pressure ที่มีระดับสูงกว่า $2x10^{-3}$ บรรยากาศ

3.3.2 ผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติก

ขั้นตอน Acidogenesis เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม ให้เป็นกรดอะซิติก โดย Acetogenic bacteria การเปลี่ยนแปลงกรดโพรพิออนิก ไปเป็นกรดอะซิติก

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad ...(12)$$

จะพบว่า มีไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย หากไม่สามารถกำจัดไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นได้ปฏิกิริยา(12) ก็จะหยุดไม่สามารถเปลี่ยนกรดโพรพิออนิกไปเป็นกรดอะซิติกได้ ปฏิกิริยา (12) จะเกิดขึ้นได้ หาก hydrogen partial pressure มีค่าไม่เกิน $9x10^{-3}$ atm; หาก

hydrogen partial pressure มีค่าสูงกว่า $9x10^{-3}$ atm ทำให้มีปริมาณกรดโพรพิออนิกสะสมอยู่ในระบบ เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก การสะสมตัวของกรดโพรพิออนิกหรือ กรดไขมันระเหยอื่นๆ จะทำให้พีเอชของระบบมีค่าต่ำลง จนทำให้อยู่ในสภาวะ ที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ และยังพบว่ากรดโพรพิออนิก เป็นพิษต่อแบคทีเรียไร้ออกซิเจนอีกด้วย

3.4 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ,UASB Process)

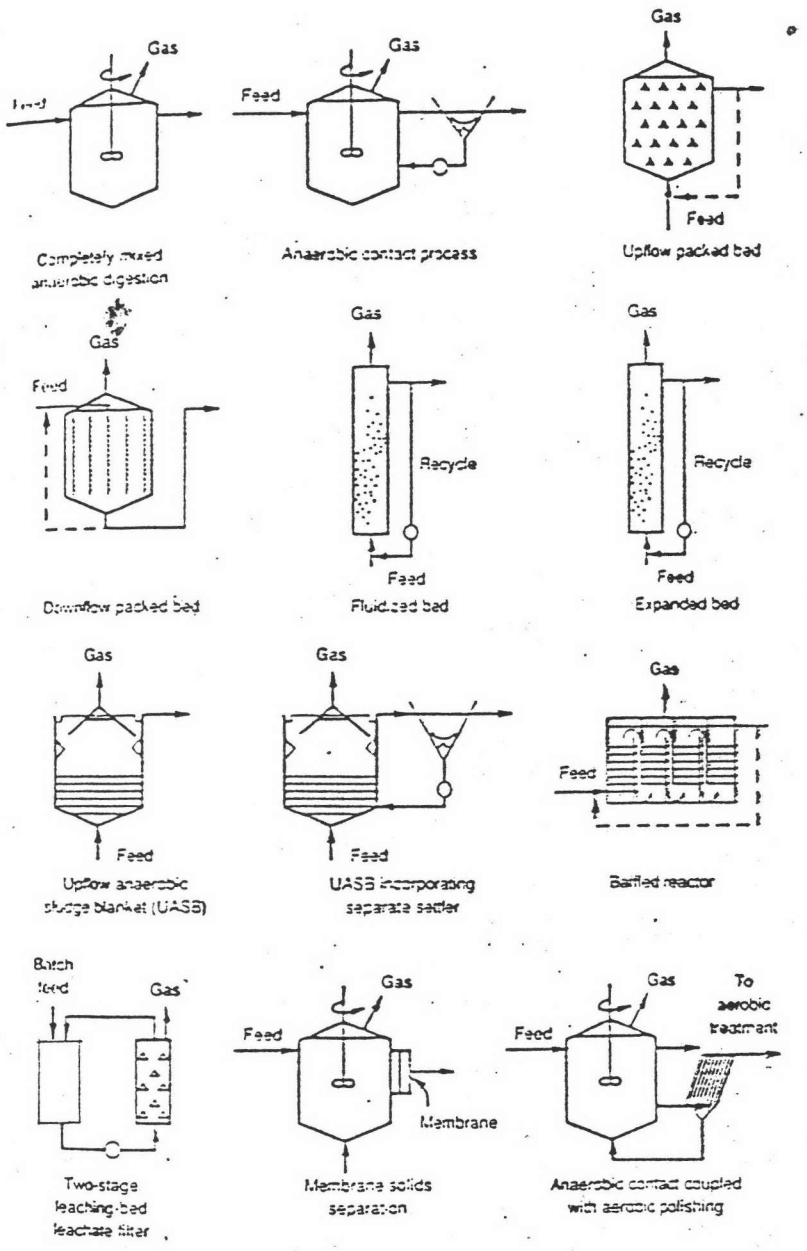
ระบบกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งแบบไร้ออกซิเจน มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น บ่อเกรอะ (Septic Tank), บ่อหมัก (Anaerobic Lagoons), ถังหมักธรรมดา (Conventional Anaerobic Digestion), ระบบถังหมักแบบสัมผัส (Anaerobic Contact หรือ Anaerobic Acivated Sludge), ระบบถังหมักสองเฟส (Two-Phase Anaerobic Digestion), ระบบเครื่องกรองไร้ออกซิเจน(Aerobic Filter), ระบบ Anaerobic Fluidized Bed (AFB) และAnaerobic Attached Film Expanded Bed (AAFEB), ระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), ระบบจานชีวหมุนแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Rotating Biological Contactor), ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic Baffled Reactor) เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีคุณสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน จากการศึกษาและทดลอง พบว่า กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน มักจะประสบปัญหาบางประการในการออกแบบ และควบคุมการทำงาน เช่น

- ความล้มเหลวในการแยกตะกอนจุลินทรีย์ไม่ให้หลุดออกไปกับน้ำออก (Effluent)
- ระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบ (Hydraulic Retention Time) นานกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน
- ความมีเสถียรภาพในการทำงานของระบบต่ำ เป็นต้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้มีความพยายามที่จะพัฒนาแก้ไขปัญหาดังกล่าวของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนกันอย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดรูปแบบต่างๆ ของระบบไร้ออกซิเจน เช่น

- ระบบถังหมักแบบสัมผัส เพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้ง และนำกลับเข้าสู่ถังหมักใหม่
- ระบบถังหมักแบบสองเฟส แยกถังหมักออกเป็นสองส่วน ตามลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ ทำให้ง่ายต่อการการควบคุมสภาวะแวดล้อม
- ระบบเครื่องกรองไร้ออกซิเจน ใส่ตัวกลางในถังหมัก เพื่อช่วยกระจายการไหลของน้ำและเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ ทำให้มีระยะเวลากักเก็บตะกอนจุลินทรีย์สูง เป็นต้น

Stander (1966) ได้ค้นพบว่าการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีอยู่ในถังหมักเป็นจำนวน



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของระบบต่างๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

(Metcalf & Eddy, 1991)

มากโดยการติดตั้งถังตกตะกอนไว้ตอนบนของถังหมัก จะทำให้สามารถลดระยะเวลาในการบำบัดให้สั้นลง และยังสามารถรับปริมาณน้ำเสียเข้าสู่ระบบได้มากขึ้นด้วย ต่อมาระบบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นตามลำดับในประเทศเนเธอร์แลนด์ โดย Lettinga และคณะ (1980) โดยการพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ (Gas-solid separator device , GSS device) ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบดังกล่าวคือ ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ,UASB)

ปัจจุบัน สภาวะขาดแคลนพลังงานเป็นปัญหาสำคัญ ทำให้วิศวกรได้หันกลับมาสนใจและพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสีย แบบไร้ออกซิเจนมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน จะได้ก๊าซชีวภาพ ซึ่งนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ จากที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ระบบที่วิศวกรต้องการจะต้องเป็นระบบที่มีความประหยัดที่สุด ทั้งในด้านการลงทุน และในด้านการควบคุมระบบ รวมถึงการบำรุงรักษา เมื่อพิจารณาจากระบบต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบันพบว่า ระบบยูเอเอสบีจะมีความเหมาะสมที่สุด ได้มีการพัฒนาและศึกษาถึงความเป็นไปได้ของระบบนี้กันอย่างกว้างขวาง จำนวนของถังยูเอเอสบี ที่ใช้อยู่จนถึงเดือนกันยายน ค.ศ. 1990 มีประมาณ 205 ถังเป็นอย่างน้อย (ตารางที่ 3.1)

3.4.1 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี

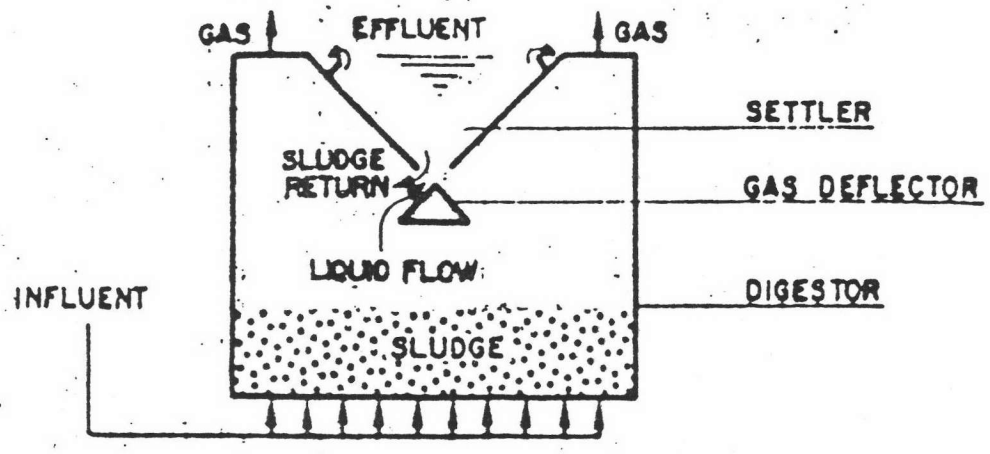
ลักษณะทั่วไปของถังยูเอเอสบี เป็นถังปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงกระบอกก็ได้ ถังยูเอเอสบีจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ (ภาพที่ 3.7)

- ส่วนแรกเป็นถังหมักพร้อมด้วยระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) อยู่ด้านล่างของถัง
- ส่วนที่สองเป็นถังตกตะกอนอยู่ด้านบนของถัง ประกอบด้วยแผ่นกั้นเอียงทำมุมประมาณ 45° - 60° (Lettinga,1991) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ทำหน้าที่แยกของเหลว ก๊าซ และ ตะกอนจุลินทรีย์ออกจากกัน และยังทำหน้าที่ป้องกันการหลุดออกมาของตะกอนจุลินทรีย์ ตารางที่ 3.2 และ 3.3 แสดงวัตถุประสงค์ของอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอยและข้อแนะนำในการออกแบบอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอยตามลำดับ

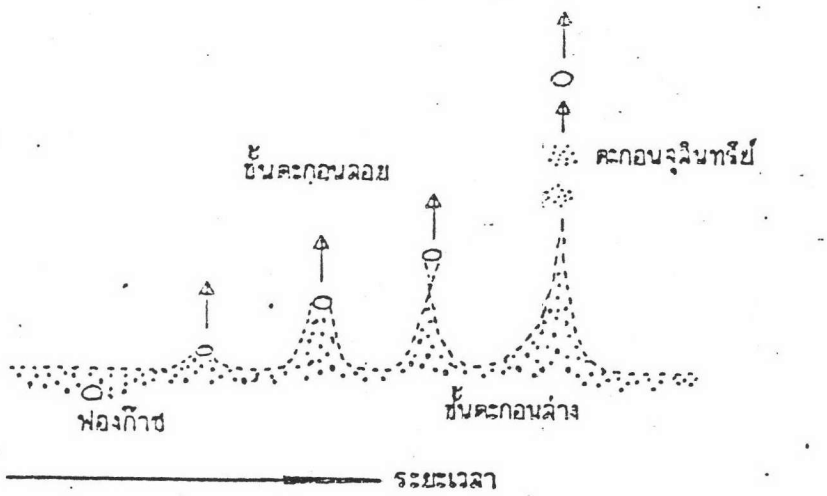
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนโรงบำบัดน้ำเสียที่ใช้ระบบ UASB ก่อนเดือนกันยายน ค.ศ 1990 (Lettinga, 1991)

Wastewater	Number of UASBs	UASB-volume (m^3)
Alcohol	20	52,000
Bakers' yeast	5	9,900
Bakery	2	347
Brewery	30	60,600
Candy	2	350
Canneries	3	2,800
Chemical	2	2,600
Chocolate	1	285
Citric acid	2	6,700
Coffee	2	1,300
Dairy and cheese	6	2,300
Distillery	8	24,000
Domestic sewage	3	3,200
Fermentation	1	750
Fruit juice	3	4,600
Fructose production	1	240
Landfill leachate	6	2,495
Paper and pulp	28	67,197
Pharmaceutical	2	400
Potato processing	27	25,610
Rubber	1	650
Sewage sludge liquor	1	1,000
Slaughterhouse	3	950
Soft drinks	4	1,385
Starch (barley, corn, potato, wheat)	16	33,500
Sugar processing	19	23,100
Vegetable and fruit	3	2,800
Yeast	4	8,550
Total	205	339,609

Source: Biogas technology in the Netherlands, publication by the Netherlands Agency for Energy and the Environment (Anonymous, 1988) and information from Biotim, Gb Biothane International, Paques BV and ATO.



ภาพที่ 3.7 ลักษณะทั่วไปของถัง UASB (M.E Souza, 1986)



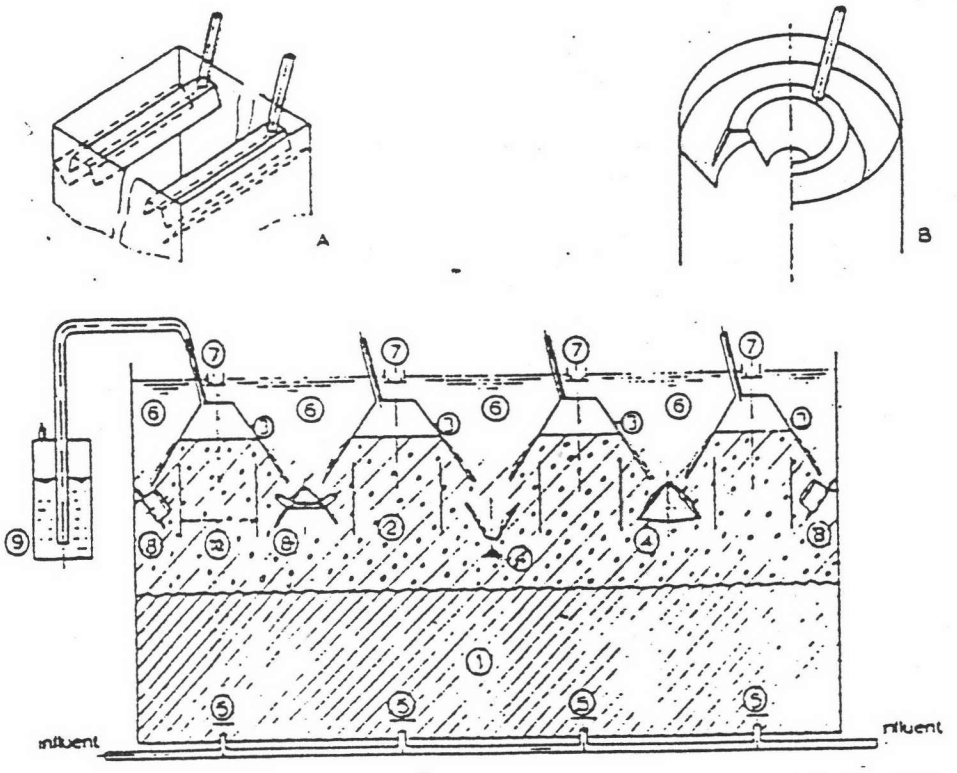
ภาพที่ 3.8 แสดงลักษณะการลอยขึ้นของตะกอนจุลินทรีย์ โดยก๊าซที่เกิดขึ้นในชั้นตะกอนนอน (Sludge bed) (ณรงค์, 2529)

ตารางที่ 3.2 วัตถุประสงค์ในการติดตั้งอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย (GSS Device) สำหรับระบบยูเอเอสบี (Lettinga,1991)

1. ทำหน้าที่แยกและนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกจากถังปฏิกิริยา
2. ป้องกันการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์
3. ช่วยให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ตกตะกอน กลับลงสู่ส่วนล่างของถังปฏิกิริยา
4. ทำหน้าที่เป็นส่วนตกตะกอน ก่อนปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบ
5. ช่วยป้องกันและกั้นไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย (sludge blanket) ซึ่งมีการขยายตัวและฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็ว เข้าไปในส่วนตกตะกอน

ตารางที่ 3.3 สรุปแนวทางและข้อแนะนำในการออกแบบอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย (GSS Device) (Lettinga,1991)

1. ความลาดเอียงของแผ่นกั้นควรมีค่าประมาณ 45°-60°
2. พื้นที่ผิวของอุปกรณ์ในส่วนที่เก็บก๊าซ ควรมีพื้นที่ประมาณ 15-20% ของพื้นที่ผิวของถังปฏิกิริยา
3. อุปกรณ์ควรมีความสูงประมาณ 1.5-2.0 เมตร สำหรับถังปฏิกิริยาที่มีความสูง 5.0-7.0 เมตร
4. พื้นที่ว่างภายในอุปกรณ์แยกสามสถานะ ต้องออกแบบให้เพียงพอสำหรับการจัดการเกี่ยวกับการสะสมและการปลดปล่อยก๊าซชีวภาพที่เกิด รวมทั้งการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น เช่น อุปกรณ์กำจัด ฝ้าไข(scum)
5. แผ่นกั้นด้านล่างและส่วนตกตะกอน ต้องมีระยะเหลื่อมกันไม่น้อยกว่า 10-20 ซม. เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซชีวภาพหลุดเข้าไปในส่วนตกตะกอน
6. ท่อนำก๊าซชีวภาพออกจากถังปฏิกิริยา ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ก๊าซชีวภาพสามารถไหลออกได้สะดวก แม้ในกรณีที่มีฟอง(foaming) เกิดขึ้น
7. ในกรณีที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ทำให้เกิดฟองมาก ต้องติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกำจัดฟองที่เกิดขึ้น
8. ควรติดตั้งแผ่นกั้นฝ้าไขไว้ทางด้านหน้าของเวียร์น้ำออก



. Various UASB reactor configurations (A = rectangular; B = cylindrical. 1 = sludge bed, 2 = liquid phase + gas, 3 = gas collectors, 4 and 8 = different designs to direct the gas into the gas collector, 5 = feed inlet system, 6 = settling compartment, 7 = overflow, 9 = water seal).

ภาพที่ 3.9 แสดงลักษณะรูปแบบต่างๆของอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย(GSS Device) และอุปกรณ์อื่นๆในระบบ UASB (Lettinga, 1986)

การทำงานของระบบยูเอเอสบี จะต้องมีการเติมเชื้อแบคทีเรียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีก่อนและรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ ที่มีความเข้มข้น 40-100 kg.VSS/m^3 ขึ้นที่ก้นถังเรียกว่า ชั้นตะกอนนอน (Sludge bed) ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่น และมีลักษณะเป็นเม็ด หรือเกล็ด(granular or pellet) มีความเร็วในการจมตัวสูง (high setting velocity) การรวมตัวเป็นเม็ดของตะกอนจุลินทรีย์ ขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียที่นำมาบำบัด และเชื้อแบคทีเรียที่เราใช้ในครั้งแรก ด้านบนของชั้นตะกอนนอน เป็นชั้นของตะกอนลอย (sludge blanket) ที่มีความเร็วในการจมตัวต่ำ (low setting velocity) และมีความเข้มข้นประมาณ 15-30 kg.VSS/m^3

น้ำเสียถูกป้อนเข้าทางตอนล่างของถัง เพื่อให้สัมผัสกับตะกอนจุลินทรีย์ในถังอย่างทั่วถึง น้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนนอนย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้เกิดเซลล์ของจุลินทรีย์และก๊าซต่างๆ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเกาะอยู่ตามตะกอนจุลินทรีย์ ความเร็วของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบและฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะไหลขึ้น และพาเอาตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นสู่ด้านบน ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนที่แขวนลอย ที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำกว่าชั้นตะกอนนอน ระหว่างที่น้ำเสียไหลขึ้นสู่ส่วนที่เป็นถังตกตะกอนทางด้านบน สารอินทรีย์ในน้ำเสียยังคงถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย เมื่อน้ำเสียไหลสู่ส่วนบนของถัง ซึ่งเป็นอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย น้ำเสียจะปะทะกับแผ่นกั้น ซึ่งเอียงทำมุม 45° - 60° ซึ่งทำหน้าที่แยกก๊าซที่เกิดขึ้นให้หลุดออกจากกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์ ก๊าซที่เกิดถูกเก็บกักในส่วนบน แล้วไหลออกไปตามท่อสู่ที่เก็บกัก เมื่อแรงดันของก๊าซที่เกิดมากกว่าแรงดันของที่เก็บกัก น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะแยกตัวจากตะกอนจุลินทรีย์ และไหลออกทางด้านบนของถัง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะตกสู่ก้นถังตกตะกอน และจมลงสู่ด้านล่างของถังยูเอเอสบี ต่อไป

ในระบบนี้ ปัจจัยสำคัญของระบบคือการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้รวมตัวกันเป็นเม็ดหรือเกล็ดตะกอน จนกระทั่งมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากจนสามารถตกตะกอนได้ดี เพราะถ้าไม่สามารถสร้างตะกอนจุลินทรีย์ให้มีลักษณะดังกล่าวได้ ข้อดีของระบบนี้จะกลายเป็นข้อเสียของระบบกล่าวคือ จะเกิดปัญหาการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบด้อยลงและอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ในที่สุด

3.4.2 กลไกการเกิดเม็ด หรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol และคณะ (1983) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ผลจากผลการทดลองให้ผลที่คล้ายคลึงกัน โดยสังเกตุจากพฤติกรรมในการคงอยู่ หรือการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ (ภาพที่ 3.10)

จากการทดลอง Hulshoff Pol และคณะ ได้กล่าวถึงขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอน ตะกอนจุลินทรีย์ ไว้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

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

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีแล้ว ชั้นตะกอนนอนจะเกิดการขยายตัว เนื่องมาจากน้ำเสียที่เราป้อนเข้าไปและการเริ่มเกิดก๊าซในระบบ เกิดจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย(filamentous organisms) ในระบบ ซึ่งทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

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

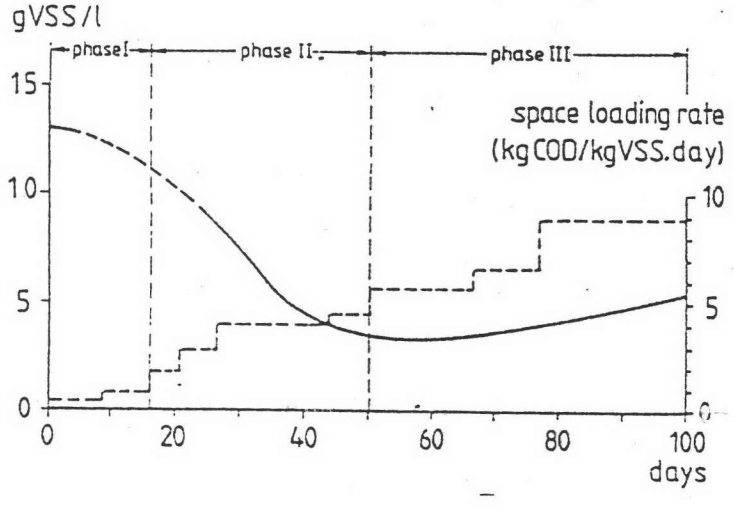
มีการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กๆออกนอกถัง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และหนักจะสามารถคงอยู่ในถังได้ ระบบมีการสร้างจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น และมีการรวมตัวกันของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนจมอยู่ในส่วนล่างของถัง ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น พบว่ามีขนาดถึง 5 มม.

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

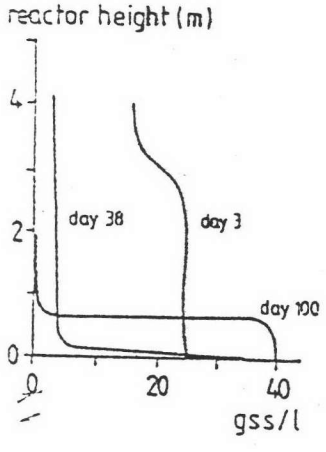
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีมากกว่าการหลุดออกนอกถังของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเมื่อหลังจากระบบได้ผ่านขั้นตอนนี้แล้ว ระบบสามารถจะรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่ระบบจะสามารถรับได้ ซึ่งจากการทดลองที่

ผ่านมาอาจรับได้สูงถึง 50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน

ลักษณะของการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในขั้นตอนทั้ง 3 ขั้นตอน แสดงในภาพที่ 3.11 ซึ่งใช้เส้นกราฟความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (g.SS/l) ตามความสูงของถังแสดงถึงขั้นตอนทั้ง 3 ดังกล่าว



ภาพที่ 3.10 แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ระหว่างขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ในถัง UASB (2B) (Hulshoff Pol ,1983)



ภาพที่ 3.11 แสดงปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ตามความสูงของถัง UASB (2B) (Hulshoff Pol ,1983)

PALNS. Sam-Soon และคณะ (1987) ทำการทดลองระบบยูเอเอสบี เพื่อศึกษาถึงที่มาและสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดเม็ดหรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำการทดลองโดยใช้น้ำแอบเปิ้ลเป็นน้ำเสีย และให้ข้อสังเกตุดังนี้ การเกิดเม็ดหรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของ H_2-Utilizing methane bacteria ชนิดหนึ่ง คือ Methanobacterium strain AZ (M.strain.AZ) กล่าวคือในสภาพแวดล้อมที่มี Hydrogen partial pressure สูง อัตราส่วน ATP/ADP สูง M.strain.AZ สามารถใช้ H_2 เป็นแหล่งพลังงานและสร้างกรดอะมิโนที่จำเป็นได้ แต่ไม่สามารถสร้าง cysteine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งและมีความสำคัญในการสร้างโปรโตพลาสซึม ทำให้ต้องอาศัย cysteine จากภายนอกเซลล์ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว และมีปริมาณ NH_3-N เพียงพอ รวมทั้งปริมาณ cysteine จากภายนอกมีจำกัด จะทำให้ M.strain.AZ สร้างกรดอะมิโนขึ้นในปริมาณมากและเมื่อมีปริมาณมากเกินไปก็จะถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ กรดอะมิโนที่ถูกปล่อยออกมาจะรวมตัวกันเป็น polypeptide ล้อมรอบจุลินทรีย์และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดเม็ดหรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น

PAINS. Sam-Soon และคณะได้สรุปลักษณะสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดเม็ดหรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ดังนี้

1. ระบบจะต้องมี Hydrogen partial pressure สูง
2. ปริมาณ NH_3-N ในระบบจะต้องมีในปริมาณที่เพียงพอ
3. ปริมาณ cysteine ในระบบต้องมีในปริมาณที่จำกัด
4. ค่าพีเอชในระบบจะต้องเป็นกลาง

และ 5. ลักษณะการไหลของน้ำเสียจะต้องเป็นลักษณะ plug flow เพราะหากเป็นแบบ completely mix จะทำให้ค่า Hydrogen partial pressure ในระบบต่ำ

3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบี เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนชนิดหนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยจุลินทรีย์ 3 กลุ่ม ดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 5.1 ซึ่งจะต้องทำงานอย่างต่อเนื่องและอยู่ในสภาพที่สมดุลย์กัน ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของระบบ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมและความต้องการของจุลินทรีย์ได้แก่ อุณหภูมิ, พีเอช, โออาร์พี กรดไขมันระเหย, สภาพความเป็นด่าง, อาหารเสริม , สารพิษเป็นต้น ส่วนปัจจัยอีกประเภทหนึ่งคือ ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ เช่น ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ การกระจายน้ำเสียเข้าอย่างทั่วถึง การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ เป็นต้น

3.5.1 ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมและความต้องการของจุลินทรีย์

3.5.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน จะมีอยู่สองช่วงคือ

- ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิคแบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria) จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30° - 40°
- ช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria) จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 45° - 55°

อุณหภูมิมีผลต่อการผลิตก๊าซของจุลินทรีย์อย่างมาก การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2° - 3° ซ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก

3.5.1.2 พีเอช กรดไขมันระเหย และสภาพความเป็นด่าง (pH, Volatile Fatty Acids, Alkalinity)

พีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.7 - 7.2 ซึ่งเหมาะแก่การ

ทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพีเอชต่ำกว่า

6.2 การควบคุมพีเอชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน ทำได้โดยการควบคุมปริมาณของกรดไขมันระเหย(Volatile Fatty Acids) และสภาพด่าง(Alkalinity) โดยปกติปริมาณกรดไขมันระเหยควรมีค่าประมาณ 200-400 มก./ล. ในรูปของกรดอะซิติค หากปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณให้เห็นถึงความเสียสมดุลย์เกิดขึ้นในถังย่อย ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วของความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยแสดงว่ามีบางอย่างเกิดขึ้นทำให้ชลอการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน หรือทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น สภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนตจะบอกให้ทราบถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ของระบบ หากกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้พีเอชของระบบลดลงและเกิดขึ้นรวดเร็ว หากในระบบมีสภาพด่างสูงพอ ระบบก็จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ โดยทั่วไประบบไร้ออกซิเจนควรจะมีสภาพด่างประมาณ 1500-2000 มก./ล. ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งก็คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดไขมันระเหย(มก./ล. ของกรดอะซิติก) ต่อระดับสภาพด่างไบคาร์บอเนต(มก./ล. ของแคลเซี่ยมคาร์บอเนต) อัตราส่วนดังกล่าวนี้ถ้าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบไร้ออกซิเจนมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 จะเห็นได้ว่าพีเอชของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วหรือได้ลดลงแล้ว

สารเคมีที่ใช้เติมเพื่อเพิ่มสภาพด่างให้แก่ระบบ มีอยู่หลายประเภท เช่น พวกด่างแก่ สารไบคาร์บอเนต และสารพวกคาร์บอเนต แต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต($NaHCO_3$) เป็นสารเคมีตัวที่ดีที่สุดในการควบคุมพีเอช เพราะว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถละลายน้ำได้ดี และให้สภาพด่างไบคาร์บอเนตแก่ระบบโดยตรง แต่จะมีราคาแพงกว่าสารเคมีตัวอื่นๆ Lettinga และคณะ (1983) ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์($Ca(OH_2)$) เป็นบัฟเฟอร์แทนโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยใช้ถังยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบ ปรากฏว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถรักษากำลังบัฟเฟอร์ได้ดี และทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ระบบมีความสามารถในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น

3.5.1.3 ศักยภาพการให้และรับอิเลคตรอน(Oxidation - Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเลคตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction Reaction) หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ซึ่งเกิดจากผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเลคตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเลคตรอน) ความแตกต่างทางด้านศักยภาพหรือความสามารถในการให้และรับอิเลคตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองอาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โพเทนเชียล หรือเรียกสั้นว่า โออาร์พี (ORP)

ปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ จึงต้องมีสารที่รับอิเลคตรอน(Oxidizing Agent) และสารที่ให้อิเลคตรอน(Reducing Agent) ควบคู่กันเสมอ สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียมักเป็นตัวที่ให้อิเลคตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน จะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอน ซึ่งจะออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้มีพลังงานลดลง นั่นคือมีการปรับสภาพน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น ส่วนในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจะไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเลคตรอน แต่จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือกรดอะซิติกแทน

<u>ส่วนประกอบของเครื่องวัดโออาร์พี</u>

1. Inert Metal Electrode หรือ Unattackable Eletrode จะทำจากโลหะมีตระกูลเช่น ทองคำขาว (Platinum) ทอง (Gold) หรือนิเกิล (Nickle) ซึ่งมีหน้าที่ในการนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่มีส่วนในการวัดศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

2. Reference Electrode อาจเป็น Hydrogen Reference Electrode ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความต่างศักย์มาตรฐาน (E_h) แต่ถ้า Reference Electrode เป็น Silver-Silver Chloride ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ต้องนำมาแก้ไขให้เป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานตามสมการที่ 13

$$E_h = E + \text{Voltage of Reference Electrode} \quad ..(13)$$

เมื่อ E_h = ศักย์ไฟฟ้าจาก Hydrogen reference Electrode

E = ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จริงจากการใช้ Reference Electrode แบบ Calomel หรือ Silver-Silver Chloride

โดยกำหนด Voltage of Reference Electrode ไว้ดังนี้

สำหรับ Calomel Reference Electrode (sat.KCl at 25°C)
= +244.3 mv.

Silver - Silver Chloride (4M. KCl at 25°C)
= +199 mv.

Hydrogen Reference Electrode = 0 mv.

3. Salt Bridge จะเป็นสะพานเชื่อมถ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายที่ถูกย่อยสลาย

4. Potentiometer

เนื่องจากค่าโออาร์พีจะบอกถึงอัตราส่วนสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ต่อสารที่เป็นตัวรีดิวซ์รวมในระบบ หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือ บอกเฉพาะความเข้มสัมพัทธ์ ไม่อาจบอกความจุหรือปริมาณอันแท้จริง เพราะปฏิกิริยารีดอกซ์มีการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดต่อความแม่นยำในการวัด ความสัมพัทธ์ทางด้านปริมาณของปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจแสดงได้ในรูปสมการของเนินชท์ (Nernst Equation) ดังสมการที่ 14

$$E_h = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Oxidant)}{(Reductant)} \quad ..(14)$$

เมื่อ E_h = ศักย์ไฟฟ้าในระบบเมื่อเทียบจากไฮโดรเจนอิเลคโทรด, โวลท์

E_o = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในระบบเมื่อปฏิกิริยาของสารออกซิแดนท์เท่ากับสารรีดักแทนท์ ที่ 25 °ซ , โวลท์

R = 8.315 (ค่าคงที่ของก๊าซ), โวลท์ , คูลอมบ์

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, องศาเคลวิน

F = 98500 คูลอมบ์

n = จำนวนอิเลคตรอนที่ถ่ายเทในปฏิกิริยารีดอกซ์

หรืออาจเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$E_h = E_o + \frac{0.0591}{n} \log \frac{(Oxidant)}{(Reductant)} \quad ..(15)$$

ในระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน อัตราส่วนของสารออกซิแดนท์ต่อรีดักแทนท์จะมีค่าสูง นั่นคือศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะมีค่าบวกมากกว่า แต่ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน อัตราส่วนนี้จะมีค่าต่ำ ศักย์ไฟฟ้าจึงมีแนวโน้มที่จะมีค่าติดลบ

ข้อจำกัดของการวัดโออาร์พี

1. โออาร์พีเป็นผลจากอิทธิพลของสารออกซิแดนท์และรีดักแทนท์

2. ผิวของอิเลคโทรดง่ายแก่การถูกเคลือบจากสารที่เกิดการถ่ายเทอิเลคตรอน หรือ การเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization)

3. สารที่เป็นออกซิแดนท์หรือรีดักแทนท์ ที่เข้มข้นจะทำให้เป็นเสมือนมีปฏิกิริยาติดค้าง (Memory Effect) อยู่ที่ผิวของอิเลคโทรด

4. พีเอชของสารละลายมีผลต่อการวัด เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr^{+6}

5. อุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อการวัดเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 มิลลิโวลท์ ต่อ 1 °ซ ที่เปลี่ยนแปลง)

แม้ว่า ค่าโออาร์พีไม่อาจอธิบายสภาพที่แท้จริงของระบบ ขณะดำเนินไปได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามก็สามารถนำมาประเมินลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการได้

ประโยชน์ของโออาร์พีในงานบำบัดน้ำเสีย

1. ใช้เพื่อควบคุมปัญหาด้านกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสีย

2. ควบคุมการเติมอากาศในขบวนการย่อยตะกอน

3. ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน

4. ควบคุมปัญหาที่เกิดจากออกซิแดนท์หรือรีดักแทนท์ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์ หรือ ควบคุมการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr^{+6}

การนำเอาโออาร์พีมาใช้ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่ามีตัวแปรที่มีผลต่อค่าที่วัดได้หลายประการ คือ

1. ชนิดของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบ

2. สภาวะของจุลินทรีย์

3. วัฏภาคของการเจริญเติบโต(Growth Phase) ของมวลจุลชีพ

4. ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารภายในระบบ

5. สภาวะของการปฏิบัติในการควบคุมขบวนการ

6. ระยะเวลาในการวัด

จากงานวิจัยต่างๆ ปรากฏว่ามีผู้วัดค่าโออาร์พีในสภาวะไร้ออกซิเจนได้ค่าต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับค่าโออาร์พีที่วัดได้ในสภาพไร้ออกซิเจน

ผู้วิจัย	โออาร์พี (E_h) .มิลลิโวลท์	หมายเหตุ
Smith &Hungate	-335 ถึง -346	ศึกษาจากการดำรงชีพของมีเทนแบคทีเรีย
Reed & Orr	-200	ศึกษาจากแบคทีเรีย 15 ชนิด จำพวก Clostridium Spp.
Maslova & Pantskhava	-316 ถึง -356	ศึกษาจากถังหมักที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิค
Molof	-220 ถึง -290	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Dirasian	-276 ถึง -288	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Hewitt	+50 ถึง -400	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Grune	-130 ถึง -223	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจนที่รับน้ำเสียจากบ้านเรือน

3.5.1.4 ความต้องการสารอาหารที่จำเป็น (Nutrient Requirment)

ในเซลล์ของจุลินทรีย์จะประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส(P) และซัลเฟอร์ (S) ในอัตราส่วน C:N:P:S = 100:10:1:1 ดังนั้นเพื่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีพของจุลินทรีย์จึงต้องมีสารอาหารที่เพียงพอ นอกจากธาตุดังกล่าวแล้ว ในปัจจุบันยังพบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนยังต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณที่น้อยมากแต่ขาดไม่ได้ ธาตุดังกล่าวได้แก่ เหล็ก โคบอลท์ นิเกิล และซัลเฟอร์(ในรูปของซัลไฟด์) ดังนั้นถ้าในน้ำเสียขาดธาตุต่างๆดังกล่าว ปฏิกิริยาไร้ออกซิเจนก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการเติมการเติมธาตุดังกล่าวเพื่อให้แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดีก็ไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่างๆตกผลึกและแยกตัวออกจากน้ำ และโลหะซัลไฟด์ เช่น FeS หรือ NiS ละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจะต้องมั่นใจว่าแบคทีเรียได้ธาตุโลหะที่เติมให้

3.5.1.5 สารพิษ (Toxic Materials)

น้ำเสียที่จะนำมากำจัดสารอินทรีย์ทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจนจะต้องไม่มีสารเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ความรุนแรงของพิษขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นๆ นอกจากนั้นยัง พบว่าความเป็นพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง(Toxic) ซึ่งจะยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ (Inhibited) แต่อย่างไรก็ตามถ้าสารเหล่านี้มีปริมาณน้อยพอเหมาะก็อาจช่วยให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นได้ สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งทางชีววิทยา แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

- พิษของกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid Toxicity)

กรดไขมันระเหยเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน เพราะการที่เกิดกรดไขมันระเหยเพิ่มมากขึ้น จะทำให้พีเอชลดลงซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์

I16838920

- พิษของอิออนหรือโลหะหนัก (Ion or Heavy Metal Toxicity)

ระดับความเป็นพิษของอิออนหรือโลหะหนัก ถ้ามีมากเกินจำนวนหนึ่งก็จะเกิดการเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบได้ อิออนที่สำคัญได้แก่ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} Ca^{2+} และ S^{2-} โดยปกติอิออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนลบ นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อแบคทีเรียน้อยกว่าอิออนที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะมากกว่าพิษของ Na^+ และ K^+ ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของอิออนบวกจะเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซี่สูงขึ้น และน้ำหนักอะตอมเพิ่มมากขึ้น เราสามารถลดความเป็นพิษของอิออนบวกได้โดยการทำแอนทาโกนิสซึม(Antagonism) คือเมื่ออิออนบวกอยู่ร่วมกันในความเข้มข้นที่พอเหมาะ พิษของอิออนบวกชนิดหนึ่งสามารถลดความเป็นพิษของอิออนอีกชนิดหนึ่งได้ เช่นพิษของ Na^+ เข้มข้น 3500 มก./ล. สามารถจะทำให้หมดไปได้ ถ้ามี Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50-1000 มก./ล. แต่ในทางตรงกันข้าม อิออนบวกบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของอิออนอีกชนิดหนึ่งเมื่ออยู่ร่วมกัน เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ซินเนอร์ยิสซึม (Synergism)

ส่วนพิษของโลหะหนักได้แก่ แมงกานีส , สังกะสี , แคดเมี่ยม นิเกิล , โคบอลท์ , ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของอิออน อนึ่ง พิษของโลหะหนักจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์(H_2S) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือของโลหะหนักขึ้นมา ซึ่งจะไม่ละลายน้ำ

- พิษของก๊าซบางชนิด

พิษของแอมโมเนีย(Ammonia Toxicity) แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ด้วย คือ พวกโปรตีน หรือปุ๋ยยูเรีย (Urea) ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียอิออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยสารสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมา

ได้ขึ้นกับพีเอช ดังแสดงในสมการที่ 16

$$NH_4^+ \longrightarrow NH_3 + H^+ \qquad ..(16)$$

ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวาซึ่ง NH_3 จะยับยั้งการทำงาน และเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่า NH_4^+ ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งวิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการจะรวมทั้ง NH_4^+และ NH_3 ในตารางที่ 3.5 แสดงปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 3.5 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน (McCarty,1964)

แอมโมเนียไนโตรเจน, มก./ล.	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1500-3000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
> 3000	เป็นพิษโดยตรง

การลดพิษของแอมโมเนียไนโตรเจนทำได้ โดยการเจือจาง (Dilution) น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด หรืออาจกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด

พิษของซัลไฟด์(Sulfide Toxicity) ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดการเป็นพิษของซัลไฟด์ต่อแบคทีเรียเมื่อ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีปริมาณของซัลไฟด์มาก หรือเกิดการย่อยสลายซัลเฟต(SO_4^{2-}) หรือเกิดการย่อยสลายโปรตีน ซัลไฟด์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิออนบวกที่รวมอยู่ ถ้ารวมกับโลหะหนักก็จะตกตะกอนลงมา ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริค(H_2SO_4) ได้ แบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระสามารถทนต่อซัลไฟด์ที่ละลายน้ำอันมีความเข้มข้นถึง 50 ถึง 100 มก./ล. แต่ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดนี้

การลดพิษของซัลไฟด์ทำได้โดยการทำให้ตกตะกอนของซัลไฟด์ การทำให้น้ำเสียเจือจาง หรือโดยการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าระบบ

- พิษของสารอินทรีย์ (Toxic Organic Material)

สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ สารพวกนี้ได้แก่ แอลกอฮอล์(Alcohol) และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (Long chain Fatty Acid) เช่น เมทานอล(Methanol) ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอ (Continous Feed) เพื่อทำให้แบคทีเรียคุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10000 มก./ล ก็ตาม หรืออาจแก้ไขได้โดยการเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ

3.5.2 ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ

นอกจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมดังกล่าวใน ข้อ 3.5.1 แล้ว ยังมีปัจจัยอีกส่วนหนึ่งที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ ดังต่อไปนี้

3.5.2.1 การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ

การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบ(ถังยูเอเอสบี) เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของระบบ อุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอยเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบ ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์นี้ให้ถูกต้องเหมาะสมตรงตามวัตถุประสงค์จึงเป็นเรื่องสำคัญ (Lettinga, 1991)

การออกแบบอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำเสีย ชนิดของตะกอนจุลินทรีย์ที่จะปรากฏในระบบ อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ขนาดและรูปร่างของถังยูเอเอสบี ตัวอย่างเช่น การบำบัดน้ำเสียเจือจาง ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมเวลากักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ให้ได้ตามเงื่อนไขของระบบ จึงต้องออกแบบอุปกรณ์แยกก๊าซ-ตะกอนแขวนลอย ให้มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงและมีโปรตีนหรือไขมันในปริมาณมาก ต้องติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกำจัด foam หรือ scum ที่เกิดขึ้น ในส่วนบนของอุปกรณ์เก็บก๊าซ(Lettinga,1986)

3.5.2.2 การกระจายน้ำเสียเข้าสู่ระบบอย่างทั่วถึง

เพื่อป้องกันการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย และให้มีการสัมผัสระหว่างตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียอย่างทั่วถึงทั้งถัง ต้องจัดระบบป้อนน้ำเสีย(Feed inlet system) ให้สามารถกระจายน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีได้ทั่วทั้งถัง และระบบป้อนน้ำเสียจะต้องออกแบบให้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย เนื่องจากเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่งอาจเกิดการอุดตันได้

3.5.2.3 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ การตกตะกอนของจุลินทรีย์และการเกิดก๊าซในระบบ น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะต้องมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำกว่าอัตราสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ

3.6 การศึกษาที่ผ่านมา

G.Lettinga และผู้ร่วมงานได้เริ่มทำการค้นคว้า และทดลองระบบยูเอเอสบีตั้งแต่ปี ค.ศ.1971 ดังนี้

ค.ศ.1971 ขนาดของถังที่ใช้ทดลอง มีปริมาตรตั้งแต่ 2.7-61 ลิตร ความสูง 0.30-1.05 เมตร ใช้น้ำเสียจากโรงงานต่างๆ เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานอาหารกระป๋อง ซึ่งมีค่าซีโอดี ตั้งแต่ 5,000-20,000 มก/ล.ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ระหว่าง 65-95% ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10-14 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน

ค.ศ.1975 ทำการทดลองโดยใช้ถังขนาดปริมาตร 6 ลบ.ม ความสูง 3.00 เมตร บำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล และโรงงานที่ใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบมีค่าซีโอดีระหว่าง 2,000-16,500 มก/ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 60-95% ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10-45 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน

ค.ศ.1976 ใช้ความสูงของถังปฏิกิริยา 6.00 เมตรปริมาตร 30 ลบ.ม บำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 16.7 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน และได้นำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบถังยูเอเอสบี

ค.ศ.1977 ขนาดปริมาตรถังปฏิกิริยา 200 ลบ.ม ความสูง 4.5 เมตร บำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล มีค่าซีโอดีระหว่าง 4,000-5,200 มก/ล. เวลากักเก็บน้ำเสีย 6-8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 87-95% ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 14-16 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน

ค.ศ.1983 ได้ทดลองนำระบบยูเอเอสบี มาใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนทำการทดลองโดยใช้ขนาดปริมาตรถัง 120 ลิตร ความสูง 2.00 เมตร ค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 320-950 มก/ล. ที่อุณหภูมิ 5-20°C ใช้เวลากักเก็บน้ำ 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 65-90% อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 100-200 ลิตร ของก๊าซ/กก. ซีโอดี ที่เข้าสู่ระบบ

Wiegant และ G.Lettinga (1985) ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาผลการทดลองที่อุณหภูมิ 55°C โดยใช้ถังปริมาตร 5.75 ลิตร และใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดี 14,650 มก/ล. เวลากักเก็บน้ำ 32 ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 77.6% ที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10.4 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน

Gail และ Barford (1985) ได้ศึกษาลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังยูเอเอสบี

เปรียบเทียบกับถังปฏิกิริยาแบบ upflow floc ซึ่งใช้โพลีอีเล็คโตรไลท์(polyelectrolyte) ช่วยในการตกตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานทำผลไม้เป็นสารอาหาร มีค่าซีโอดี 7,500 มก/ล. ผลปรากฏว่าตะกอนจุลินทรีย์ในถังยูเอเอสบี มีลักษณะเป็นเส้นใยประสานกันอย่างแน่นหนา (filamentous granular) ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ในถัง upflow floc มีลักษณะเป็นแท่ง(rod-shaped) เกาะกันเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีอีเล็คโตรไลต์จะช่วยเพิ่มขนาดปริมาตรตะกอนจุลินทรีย์ และป้องกันการเกิดตะกอนจุลินทรีย์แบบเส้นใย

Christensen,Gerick และ Eblen (1984) ได้ทำการทดลองโดยใช้ถังยูเอเอสบี ปริมาตร 2,200 ลบ.ม บำบัดน้ำเสียจากโรงงาน Ore-Ida ซึ่งใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบมีค่าซีโอดี 2,500 มก/ล. ที่อุณหภูมิ 35°C ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 21.2 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 85% ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน

Sonia M. และผู้ร่วมงาน (1986) ได้ทดลองนำระบบยูเอเอสบี มาใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิของบรรยากาศในเมืองเซาเปาโล ประเทศบราซิล โดยใช้ถังยูเอเอสบี ขนาด 106 ลิตร ที่เวลากักเก็บน้ำประมาณ 4 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในฤดูหนาวและฤดูร้อน ประมาณ 82-83% อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 110-119 ลิตร ของก๊าซ/กก. ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบ และนำข้อมูลในการออกแบบถังขนาด 106 ลิตร มาใช้ออกแบบถังขนาด 120 $ม^3$ รับน้ำเสียชุมชน 30 ลบ.ม./ชั่วโมง เวลากักเก็บน้ำ 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดซีโอดีได้ดี และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้อยู่ในขณะนั้น

ณรงค์ จิตต์จรุงเกียรติ (2526) ได้ทำการศึกษาโดยนำระบบยูเอเอสบี มาใช้บำบัดน้ำเสียจากถั่วเหลือง โดยมีค่าซีโอดีระหว่าง 13,784-43,734 มก/ล. ที่เวลากักเก็บน้ำ 5 วัน ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดซีโอดี 95% ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ประมาณ 2.67 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน ผลิตก๊าซมีเทนได้ 170 ลิตร/วัน

พีรพงษ์ พิทยากร (2530) ได้นำระบบยูเอเอสบีมาใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำและพีเอชสูง โดยใช้น้ำเสียของโรงงานผลิตเครื่องดื่มสำเร็จรูปจากน้ำนมถั่วเหลืองและเครื่องดื่มอัดลมต่างๆ แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ชุดแรกไม่มีถังสร้างกรด และชุดที่สองมีถังสร้างกรด โดยถังยูเอเอสบีมีขนาด 14.3 ลิตร ความสูง 2.75 เมตร ถังสร้างกรดมีขนาด 16 ลิตร ความสูง 2.00 เมตร การทดลองชุดแรกมีค่าซีโอดีระหว่าง 923-1,260 มก/ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 57-94% การทดลองชุดที่สองมีค่าซีโอดีระหว่าง 797-1,209 มก/ล.

ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 89-95% ทั้งสองชุดการทดลองใช้เวลากักเก็บน้ำ 4-24 ชั่วโมง

Lalit Kumar Agrawal (1991) ได้ทดลองระบบยูเอเอสบี โดยใช้ถังยูเอเอสบีมีปริมาตร 140 ลิตร ความสูง 4.0 ม. บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดีประมาณ 500 มก/ล. ที่เวลากักเก็บน้ำ 8-24 ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี 86% ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.56 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 128 ลิตร/กก. ซีโอดีที่ถูกกำจัด ใช้เวลาในการศึกษาทดลอง 6 เดือน

ต่อมา Kripa Shankar Singh ได้ทำการศึกษาทดลองต่อจาก Lalit Kumar Agrawal (1991) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าซีโอดีประมาณ 500 มก/ล. ที่เวลากักเก็บน้ำ 3-6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92% ที่เวลากักเก็บน้ำ 3 ชั่วโมงที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 44 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 141 ลิตร/กก.-ซีโอดีที่ถูกกำจัด ใช้เวลาในการศึกษาทดลองนาน 6 เดือน

สมพงษ์ นิลประยูร และ เสนีย์ กาญจนวงศ์ (2536) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของระบบยูเอเอสบี โดยใช้ถังยูเอเอสบีขนาดปริมาตร 24.4ลิตร สูง 3 เมตร บำบัดน้ำเสียชุมชนจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่นำมาเติมน้ำตาลให้มีค่าซีโอดี ประมาณ 228.6 และ 241.3 มก/ล. ใช้เวลากักเก็บน้ำ 4.5-24 ชั่วโมง มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.22-1.59 กก. ซีโอดี/ลบ.ม-ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 76.4-88.1% อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 25.6-101.3 ลิตร/กก. ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบ