

บทที่ 2

ทฤษฎี และ แนวความคิด

2.1 จุลชีววิทยา และ ชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอน โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอน และสารอื่นเป็นสารรับอิเล็กตรอน หากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบใช้ออกซิเจน ออกซิเจนจะเป็นสารรับอิเล็กตรอน แต่หากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบไร้ออกซิเจน สารรับอิเล็กตรอนก็จะเป็นสารอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ดังตารางที่ 2.1

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีหน้าที่ 2 ประการคือ การบำบัดสลัดจ์ หรือสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนอินทรีย์ (อาจเป็นจุลินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใดๆก็ได้) และการบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาในเรื่องการบำบัดสลัดจ์ กระบวนการไร้ออกซิเจนมักเป็นส่วนหนึ่งที่จำเป็นของระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ทำลายสารอินทรีย์ในตะกอนสลัดจ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเมื่อพิจารณาในด้านการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการไร้ออกซิเจนมักเป็นกระบวนการขั้นต้น ที่ใช้เพื่อลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลง ก่อนส่งต่อไปให้กระบวนการแอโรบิก เพื่อทำการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือ วิธีการเช่นนี้ช่วยประหยัดพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้มาก และเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีลักษณะเฉพาะตัวหลายประการ ที่แตกต่างจากกระบวนการแบบใช้ออกซิเจนอย่างเด่นชัด คือ

- มีเสถียรภาพต่ำ
- มีอัตราการสร้างตะกอนจุลินทรีย์ต่ำมาก
- ไม่สามารถลดความเข้มข้นสารอินทรีย์ให้เหลือน้อยลง
- ต้องการไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำ
- ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซมีเทน
- ไม่มีออกซิเจนอิสระเข้ามาเกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.1 สารรับอิเล็กตรอนต่างๆที่ใช้ในการหายใจ (มั่นสิน , 2525)

กระบวนการที่เกิดขึ้น	สารรับอิเล็กตรอน	ผลปฏิกิริยาที่ถูกรีดิวซ์
การหายใจแบบไร้ออกซิเจน	สารอนินทรีย์ ไนเตรต เฟอร์ริก ซัลเฟต คาร์บอนไดออกไซด์ สารอินทรีย์ ฟูมาเรต (Fumarate)	ไนไตรต์ เฟอร์รัส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีเทน ซัคซิเนต (Succinate)
การหายใจแบบใช้ออกซิเจน	ออกซิเจน	น้ำ

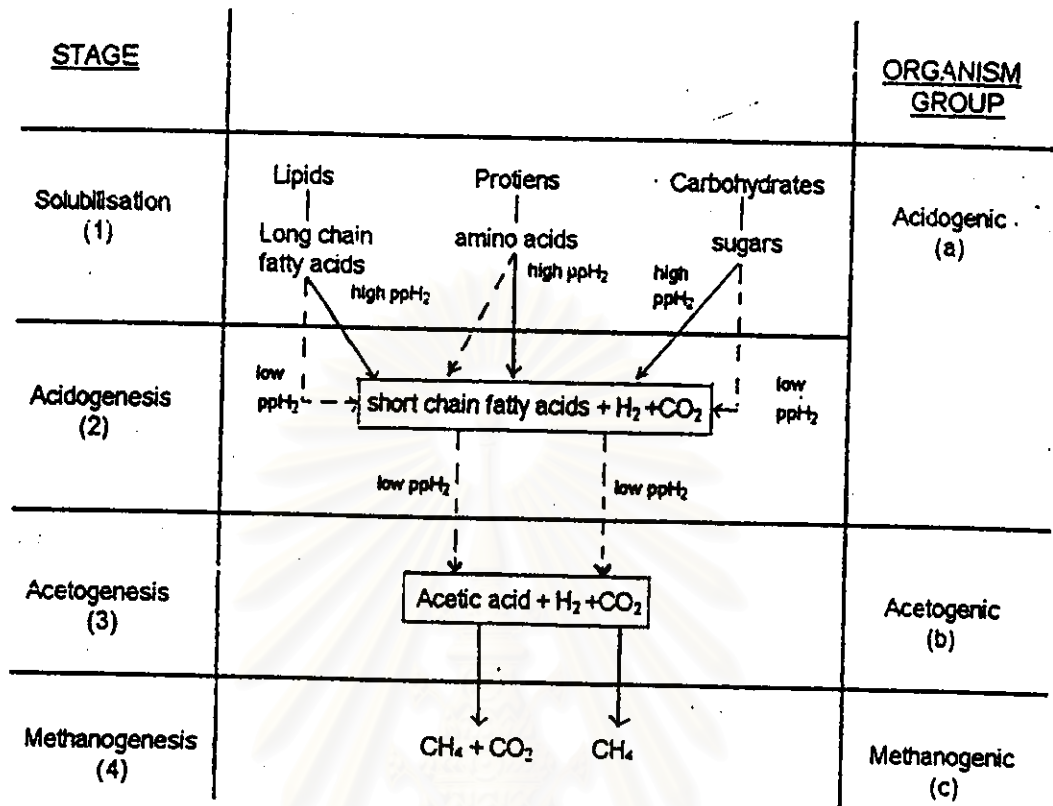
กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนเกิดปฏิกิริยา 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- การสร้างกรด (Acidogenesis)
- การสร้างอะซิเตท (Acetogenesis)
- การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ดังรูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้ออกซิเจน

2.1.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน จะถูกย่อยสลายให้มีขนาดเล็กลงจนละลายน้ำได้ โดยเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (extracellular enzyme) ของแบคทีเรียพวกสร้างกรด (acidogenic bacteria) ผลผลิตที่ได้คือ น้ำตาล กรดไขมัน และกรดอะมิโน ซึ่งแบคทีเรียสามารถดูดซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ การย่อยสลายในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมา การทำงานของเอนไซม์จะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการ

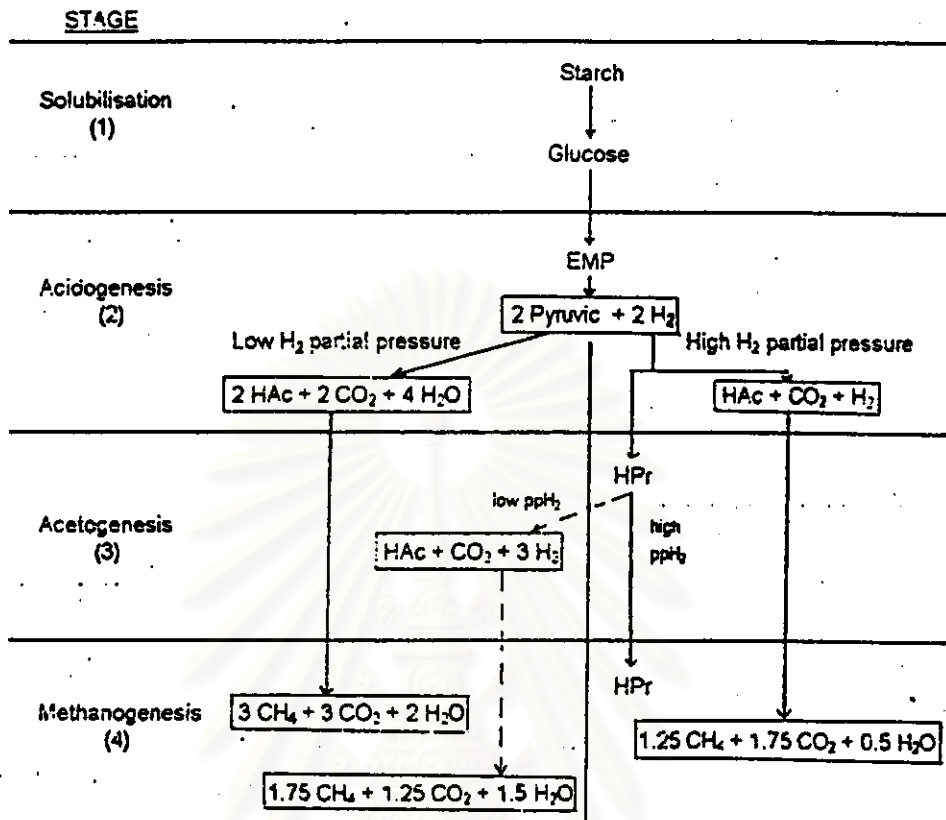


รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้ออกซิเจน
(Sam - soon et al. , 1987)

สัมพันธ์ระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิด จะใช้ เวลาต่างกัน

2.1.2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

ผลผลิตที่ได้จากการไฮโดรไลซิสได้แก่ น้ำตาล กรดไขมัน และกรดอะมิโน จะถูกดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของแบคทีเรียพวกสร้างกรด โดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) ภายในเซลล์ และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid) เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิอิก (propionic acid) กรดบิวทริก (butyric acid) เป็นต้น รวมทั้งได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยจะได้สารชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารจากขั้นตอนไฮโดรไลซิส และค่าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure , ppH_2) ผลของปฏิกิริยาที่ได้จะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวอย่างเช่น

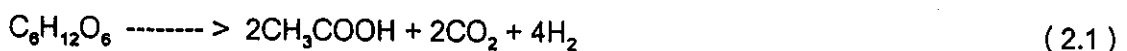


รูปที่ 2.2 การย่อยสลายของแป้งภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำและสูง

(Sam - soon et al. , 1987)

การย่อยสลายกลูโคสผ่านกระบวนการ Embden-Meyerhof pathway ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ จะได้ผลผลิตคือ กรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง จะได้ผลผลิตคือ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดโพรพิโอนิก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่ค่าต่ำ

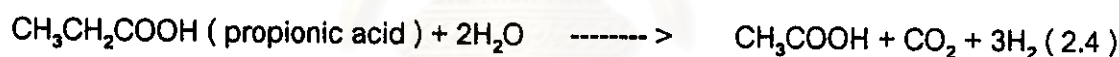


สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่ค่าสูง



2.1.3 การสร้างอะซิเตท (Acetogenesis)

แบคทีเรียสร้างมีเทน (methanogenic bacteria) ผลิตมีเทนได้โดยใช้กรดฟอร์มิก (formic) กรดอะซิติก ไฮโดรเจน เมทานอล (methanol) และเมธิลลามีน (methylamines) แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทิริก กรดไพรฟอออนิก ซึ่งเป็นสารอาหารโดยตรงในการผลิตมีเทน ดังนั้นแบคทีเรียพวก acetogenic จึงมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างไฮโดรเจน (hydrogen producing acetogenic bacteria) สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทิริก กรดไพรฟอออนิก ให้เป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนต่ำ ดังสมการ

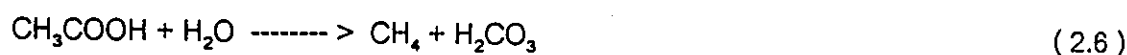


โดยแบคทีเรียสร้างไฮโดรเจนนี้ จะเป็นตัวช่วยไม่ให้เกิดการสะสมตัวของ กรดบิวทิริก กรดไพรฟอออนิก ซึ่งเป็นตัวทำให้ค่าพีเอชลดลง จนยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน

2.1.4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (obligate anaerobic) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. แบคทีเรียสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (obligate acetoclastic methanogen) แบคทีเรียชนิดนี้สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว



ปฏิกิริยาดังกล่าวจะผลิตมีเทนได้ประมาณ 70% ของมีเทนที่ได้ทั้งหมด

2. แบคทีเรียสร้างมีเทนจากไฮโดรเจน (obligate hydrogenotrophic methanogen , H₂ utilizer) แบคทีเรียชนิดนี้สร้างมีเทนจากไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน



แบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ



เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนนี้ สามารถเจริญเติบโตในช่วงพีเอช ประมาณ 6.8-7.2 และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโต รวมทั้งมักมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำ (specific growth rate) ทำให้ขั้นตอนนี้ดำเนินไปช้า และมักเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

3. แบคทีเรียสร้างมีเทนจากกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจน (hydrogenotrophic / acetoclastic methanogen) แบคทีเรียชนิดนี้สร้างมีเทนได้จากกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจน แต่ชอบไฮโดรเจนมากกว่า

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและสารอาหารที่ใช้ จะเห็นว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนส่วนใหญ่สามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งให้อิเล็กตรอน ในการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่แบคทีเรียส่วนใหญ่ในเมื่อดตะกอนในระบบยูเอเอสบี คือ แบคทีเรียพวก methanothrix และ methanosarcina ซึ่งแบคทีเรียพวก methanothrix ใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร ส่วนแบคทีเรียพวก methanosarcina สามารถใช้สารอาหารได้หลายชนิด เช่น กรดอะซิติก เมทานอล เมธิลลามีน และบางครั้งก็ใช้ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและสารอาหารที่ใช้ (Madigan et al., 1997)

Genus	Morphology	Gram reaction	Number of species	Substrates for methanogenesis	DNA (mol% GC)
Group I					
<i>Methanobacterium</i>	Long rods	+or-	8	H ₂ +CO ₂ , formate	29-61
<i>Methanobrevibacter</i>	Short rods	+	3	H ₂ +CO ₂ , formate	27-31
<i>Methanosphaera</i>	Cocci	+	1	Methanol + H ₂ (both needed)	26
Group II					
<i>Methanothermus</i>	Rods	+	2	H ₂ +CO ₂ ; can also reduce S ⁰	33
Group III					
<i>Methanococcus</i>	Irregular cocci	-	5	H ₂ +CO ₂ , pyruvate + CO ₂ , formate	29-34
Group IV					
<i>Methanomicrobium</i>	Short rods	-	2	H ₂ +CO ₂ , formate	45-49
<i>Methanogenium</i>	Irregular cocci	-	3	H ₂ +CO ₂ , formate	51-61
<i>Methanospirillum</i>	Spirilla	-	1	H ₂ +CO ₂ , formate	46-50
<i>Methanoplanus</i>	Plate-shaped cells occurring as thin plates with sharp edges	-	2	H ₂ +CO ₂ , formate	38-47
Group V					
<i>Methanosarcina</i>	Large irregular cocci in packets	+	6	H ₂ +CO ₂ , methanol, methylamines, acetate	41-43
<i>Methanobolus</i>	Irregular cocci in aggregates	-	5	Methanol, Methylamines	38-42
<i>Methanoculleus</i>	Irregular cocci	-	4	H ₂ +CO ₂ , alcohols, formate	54-62
<i>Methanohalobium</i>	Irregular cocci	-	1	Methanol, methylamines; halophilic	44
<i>Methanococcoides</i>	Irregular cocci	-	2	Methanol, methylamines	42
<i>Methanohalophilus</i>	Irregular cocci	-	3	Methanol, methylamines, methyl sulfides; halophile	41
<i>Methanotherix</i> (<i>Methanosaxia</i>)	Long rods to filaments	-	3	Acetate	52-61
Group VI					
<i>Methanopyrus</i>	Rods in chains	+	1	H ₂ +CO ₂ ; hyperthermophile, growth at 110°C	60
Group VII					
<i>Methanopusculum</i>	Irregular cocci	-	3	H ₂ +CO ₂ , formate, alcohols	48-52

2.2 ตัวอย่างวิถีชีวเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย

สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนแรก กรดไขมันจะถูกออกซิไดซ์ให้เป็นกรดไพรูวิก ดังสมการ



กรดไขมันแต่ละโมเลกุลจะผลิตกรดไพรูวิก 2 โมลและ ATP 2 โมล โดยมีโคเอนไซม์ NAD^+ เป็นพาหนะของอิเล็กตรอน และไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH และเนื่องจากปริมาณ NAD^+ มีจำกัด จึงต้องมีวิธีปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ให้เป็น NAD^+ เช่นเดิม เพื่อให้เป็นพาหนะขนส่งอิเล็กตรอนได้อีก โดยปกติการปลดปล่อย H^+ จาก NADH ให้เป็น NAD^+ จะเกิดขึ้นดังสมการ



สมการที่ 2 สามารถดำเนินไปได้ตราบเท่าที่ H_2 สามารถหนีออกจากระบบได้ ดังนั้นสมการ (2) จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (น้อยกว่า 10^{-6} บรรยากาศ , Sam - Soon et al. , 1987)

ขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไพรูวิก จากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดไขมันระเหย ซึ่งจะเป็นชนิดใดนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนดังนี้

กรณีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ

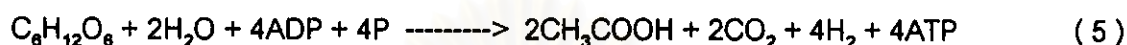
กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นอะซิติลโคเอ (CH_3CoA) ดังสมการ



โดยมี NAD^+ เป็นพาหนะของอิเล็กตรอน ซึ่ง NAD^+ ได้จากการปลดปล่อย H^+ จากสมการ (2) อะซิติลโคเอจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นกรดอะซิติล พร้อมกับสร้าง ATP ดังสมการ



เมื่อรวมสมการ (1), (2), (3) และ (4) เข้าด้วยกัน จะได้ปฏิกิริยาการหมักที่สมบูรณ์ ภายใต้อาหารความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนต่ำดังนี้



จากสมการที่ (5) พบว่าการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกลูโคส 1 โมล ภายใต้อาหารความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ จะได้กรดอะซิติก 2 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมล ไฮโดรเจน 4 โมล และ ATP 4 โมล

และถ้าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย H_2 - utilizing bacteria สามารถใช้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในการผลิตมีเทน หรือ sulfate - reducing bacteria (SBR) ก็สามารถใช้ไฮโดรเจนได้ดังสมการ

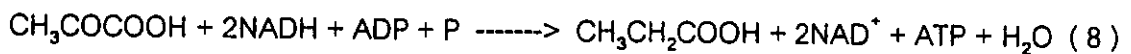


จากสมการ (6) และ (7) จะมีผลทำให้ความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจน มีค่าต่ำเสมอ แต่ในสมการ (7) จะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียเกิดขึ้นด้วย

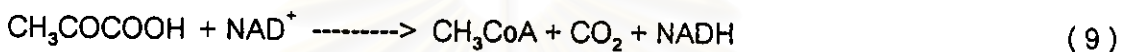
กรณีความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง

อย่างไรก็ตามหาก H_2 - utilizing methane bacteria ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือไม่มีแบคทีเรียดังกล่าวอยู่ในระบบ เป็นผลให้เกิดการสะสมตัวของไฮโดรเจนในระบบ จนทำให้ค่าความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนมีค่าสูงทำให้ NADH ไม่สามารถปลดปล่อย H^+ ตามสมการ (2) ได้ เนื่องจาก H_2 ไม่สามารถหนีออกไปจากระบบได้ แบคทีเรียชนิดนี้ไม่สามารถสร้างมีเทนจึงต้องหาวิธีอื่นในการฟื้นอำนาจ NADH เพื่อให้ปฏิกิริยาการหมักสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยใช้วิธีการสร้างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเอง และใช้เป็นปฏิกิริยาควบคู่ในการเปลี่ยน

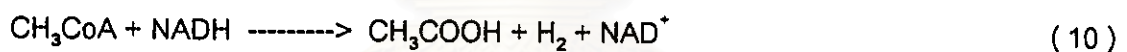
NADH ให้เป็น NAD^+ พบว่าการเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้เป็นกรดไพรูพอนิก สามารถทำให้ NADH ปลดปล่อย H^+ ได้ดังสมการ



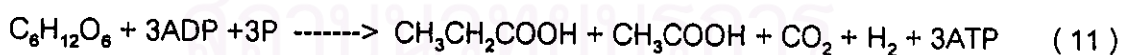
จะเห็นว่ากรดไพรูวิก 1 โมล สามารถปลดปล่อย H^+ จาก NADH ได้ 2 โมล แต่ยังมีกรดไพรูวิก เหลืออีก 1 โมล ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นอะซิติลโคเอตามปกติ ดังสมการ



และพบว่า เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ก็จะเกิดปัญหาในการฟื้นอำนาจให้แก่ NADH เช่นเดิมถ้าความดัน พาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ การฟื้นอำนาจจะเป็นไปตามปกติ แต่ถ้าความดันพาร์เชียลของ ไฮโดรเจนมีค่าสูง การฟื้นอำนาจของ NADH ก็จะทำให้เกิดควมคู่ไปกับการเปลี่ยนอะซิติลโคเอไปเป็น กรดอะซิติค ดังสมการ



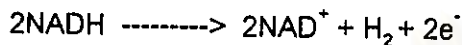
เมื่อรวมสมการ (1), (8), (9) และ (10) เข้าด้วยกัน จะได้ปฏิกิริยาการหมักที่ สมบูรณ์ ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง ดังนี้



นั่นคือการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกลูโคส 1 โมล ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียล ของไฮโดรเจนมีค่าสูง จะได้กรดไพรูพอนิก 1 โมล กรดอะซิติค 1 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ไฮโดรเจน 1 โมล และ ATP 3 โมล เมื่อเปรียบเทียบสมการ (5) กับ (11) ในขั้นตอนการสร้าง กรด จะเห็นว่าการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ภายใต้ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ จะ ให้ ATP 4 โมล และผลิตกรดอะซิติค 2 โมล ในขณะที่สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่า สูงจะให้ ATP เพียง 3 โมล และผลิตกรดอะซิติคและกรดไพรูพอนิกอย่างละ 1 โมล

2.3 บทบาทของไฮโดรเจนที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ขั้นตอนต่างๆของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จะมีการผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยไฮโดรเจนเกิดจากปฏิกิริยาการปลดปล่อย H^+ ของ NADH ดังสมการ (2)



ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการฟื้นฟูของ NAD^+ เพื่อใช้เป็นพาหะของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์



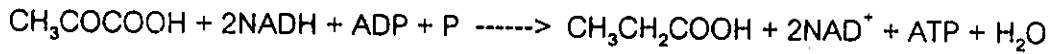
ภายใต้สภาวะความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ สมการ (2) จะเกิดขึ้นได้โดย H_2 สามารถหนีออกจากน้ำสู่บรรยากาศภายในถังย่อย ทำให้ปฏิกิริยาในสมการ (2) สามารถเกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาได้ตลอดเวลา หากกระบวนการไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะต้องมีการทำงานที่สัมพันธ์กันของ H_2 utilizing methane bacteria โดยใช้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในการผลิตมีเทนตามสมการ (6)



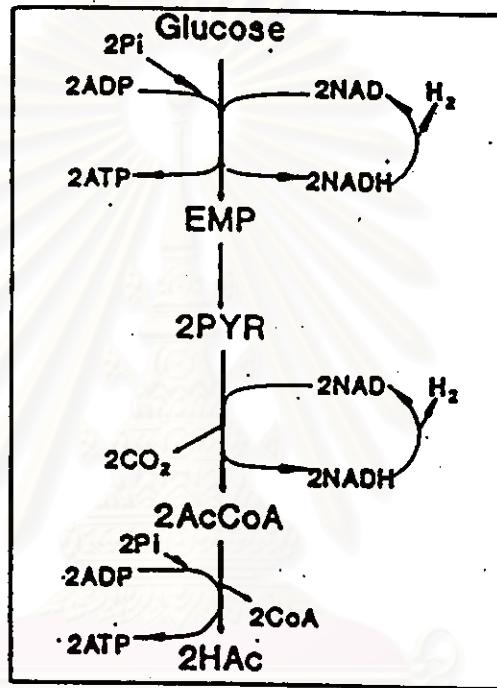
การสะสมตัวของไฮโดรเจนจึงไม่เกิดขึ้น ความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนจึงมีค่าต่ำตลอดเวลา แต่ถ้าการทำลายไฮโดรเจนไม่มีประสิทธิภาพ หรือไม่เกิดขึ้น ทำให้ไฮโดรเจนเกิดการสะสมตัวจนถึงจุดอิ่มตัวแล้ว ความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนจะมีค่าสูงขึ้น ก่อให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการไร้ออกซิเจน 2 ประการ คือ

2.3.1. ผลกระทบต่อการสร้างกรดไขมันระเหย

เมื่อไฮโดรเจนเกิดการสะสมตัวมาก จนความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนมีค่าสูง ทำให้แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนทางปลดปล่อย H^+ จาก NADH โดยการเปลี่ยนกรดไพรูวิกไปเป็นกรดไพรูทออนิก ดังสมการ (8)



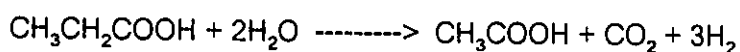
ปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดขึ้น ในสภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ ปฏิกิริยาการสร้างกรดไขมันระเหย ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ และ สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4

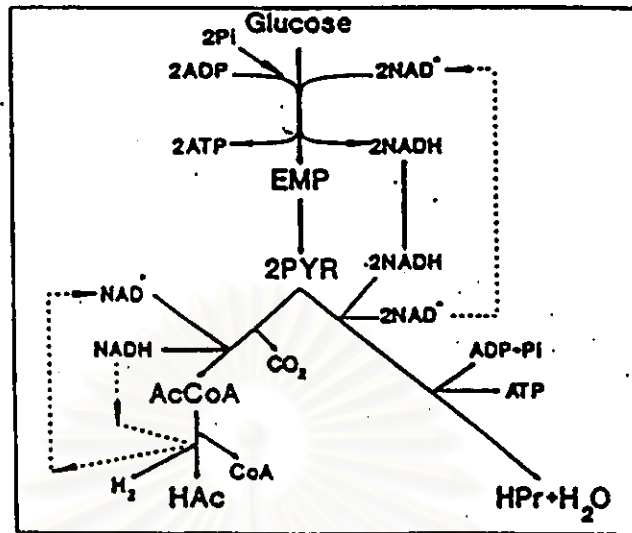


รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำโดยวิธีทาง EMP (EMP-Embden-Meyerhof pathway ; PYR - pyruvic acid ; AcCoA - acetyl coenzyme A ; HAc - acetic acid) , (Sam-Soon et al. , 1987)

2.3.2. ผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติก

ในขั้นตอนการสร้างอะซิเตท เป็นขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม ให้เป็นกรดอะซิติก โดย acetogenic bacteria ก่อน จึงสามารถนำไปสร้างมีเทนได้ การเปลี่ยนแปลงกรดไพโรฟิออนิกไปเป็นกรดอะซิติกแสดงได้ดังสมการ





รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูงโดยวิธีทาง EMP (EMP-Embden-Meyerhof pathway ; PYR - pyruvic acid ; AcCoA - acetyl coenzyme A ; HAc - acetic acid) , (Sam-Soon et al. , 1987)

พบว่าไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย หากไฮโดรเจนไม่ถูกกำจัดออก ปฏิกิริยาในสมการที่ (13) จะหยุด ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนกรดไพรูวอนิกไปเป็นกรดอะซิติกได้ หากความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าไม่เกิน $9 \cdot 10^{-3}$ บรรยากาศ ปฏิกิริยา (13) จะดำเนินไปได้ แต่หากมีค่าเกิน $9 \cdot 10^{-3}$ บรรยากาศ จะทำให้มีกรดไพรูวอนิกสะสมอยู่ในระบบ เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก การสะสมตัวของกรดไพรูวอนิก หรือ กรดไขมันระเหยอื่นๆ จะทำให้ค่าพีเอชของระบบมีค่าต่ำลง จนทำให้ระบบมีสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และยังพบว่ากรดไพรูวอนิกเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 1000 มก/ล จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียไร้ออกซิเจน

2.4 ระบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket)

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงสำหรับการบำบัดน้ำเสียหลายชนิด เป็นที่ยอมรับและมีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีมากในประเทศเนเธอร์แลนด์ แต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมมากนักในอีกหลายประเทศ อาจเนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

- ขาดแคลนข้อมูลที่เพียงพอเกี่ยวกับการติดตั้งระบบแบบไร้ออกซิเจน
- ขาดหลักความรู้พื้นฐาน ทางด้านวิศวกรรมสุขาภิบาล

- เนื่องจากเหตุผลทางการค้า เช่น บริษัทส่วนมากได้ลงทุนศึกษาค้นคว้า และ จัดลิขสิทธิ์กับระบบแบบเติมอากาศไปก่อนแล้ว
- ขาดการให้การศึกษาด้านวิศวกรรม
- ขาดโครงสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐาน , การประสานงาน , การค้นคว้า และ ศูนย์กลางด้านการศึกษาข้อมูล
- กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน มีลักษณะทางเทคโนโลยีชีวภาพมากกว่าทางด้านวิศวกรรมโยธา / สุขาภิบาล
- เทคโนโลยีทางด้านนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก จากสถาบันค้นคว้าและบริษัทเอกชน

ปัญหาที่มักพบเสมอของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน มีหลายประการ เช่น

- ความยากลำบากในการแยกตะกอนแบคทีเรียทำให้ตะกอนแบคทีเรียมักหลุดออกไปกับน้ำทิ้งของระบบ
- ระบบบำบัดแบบนี้มักต้องใช้เวลากักน้ำ (hydraulic detention time) นาน ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่
- ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานต่ำ

ระบบยูเอเอสบีถูกพัฒนาขึ้นโดย Lettinga และคณะ ในช่วงปลายทศวรรษที่ 70 โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเอาชนะปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ระบบนี้ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบที่ประหยัดทั้งด้านการลงทุน การควบคุมระบบ ตลอดจนการบำรุงรักษา การใช้ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ให้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนอื่นๆ จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจและใช้กันอย่างกว้างขวาง

2.4.1 ข้อดี และ ข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนพลังงานในปัจจุบัน รวมทั้งการสามารถแยกเชื้อแบคทีเรีย เช่น พวก methanogenic bacteria ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์ได้สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียพวก anaerobic มากขึ้น การใช้ระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสีย มีข้อดีข้อเสียดังนี้

ข้อดี

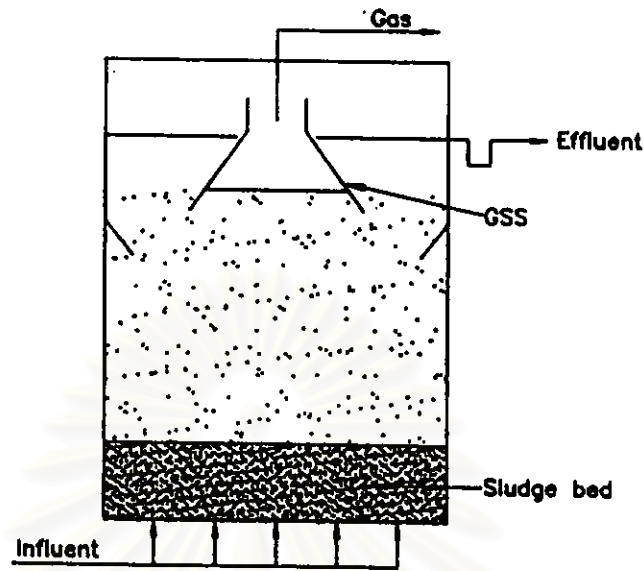
1. การก่อสร้างและควบคุมระบบ สามารถกระทำได้ง่ายและมีราคาถูก
2. มักจะไม่ต้องการใช้ไฟฟ้าและไม่ต้องการใช้เครื่องจักรกล
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในระบบบำบัดขนาดเล็กมากไปจนถึงขนาดใหญ่มาก จึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบบำบัดขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว
4. เมื่อไม่จำเป็นจะต้องใช้โรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว ก็จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วน of ระบบดักรวบรวม และขนส่งน้ำเสียลงไปได้
5. ปริมาณการเกิดกากตะกอน (sludge) มีน้อย ในระบบไม่ใช้ออกซิเจน สารอินทรีย์จะเปลี่ยนไปเป็นเซลล์จุลินทรีย์ประมาณ 10% ในขณะที่ในระบบใช้ออกซิเจน สารอินทรีย์จะเปลี่ยนไปเป็นเซลล์จุลินทรีย์ถึง 50%
6. กากตะกอนที่เกิดขึ้นมีความคงตัวสูง และสามารถทำ dewatering ได้ง่าย
7. ได้มีเทนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา ก๊าซตัวนี้ใช้เป็นพลังงานได้
8. ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบใช้ออกซิเจน
9. สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่เป็นปัญหา และการเริ่มต้นเดินระบบใหม่ก็กระทำได้ง่าย ระบบสามารถฟื้นตัวได้รวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู
10. ระบบบำบัดน้ำเสียไม่ใช้ออกซิเจน สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษบางอย่างได้ เช่น พวก halogenated solvents

ข้อเสีย

1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ไม่สามารถใช้เป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้ เนื่องจากยังคงมีสาร intermediates ต่างๆหลงเหลืออยู่ทำให้น้ำทิ้งมักมี BOD สูง
2. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมักมีปัญหาที่อุณหภูมิต่ำ
3. ความรู้และประสบการณ์ในขั้นการทำงานจริงยังมีอยู่ไม่มากนัก

2.4.2 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ลักษณะทั่วไปเป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยม หรือ ทรงกระบอกก็ได้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือ



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะทั่วไปของถังปฏิกริยาอุเอเอสบี

1. ส่วนแรกเป็นถังปฏิกริยาและระบบป้อนน้ำเสีย (feed inlet system) อยู่ด้านล่างของถัง
2. ส่วนที่สองเป็นส่วนแยกน้ำ, ก๊าซ และตะกอนแขวนลอยอยู่ด้านบนของถัง

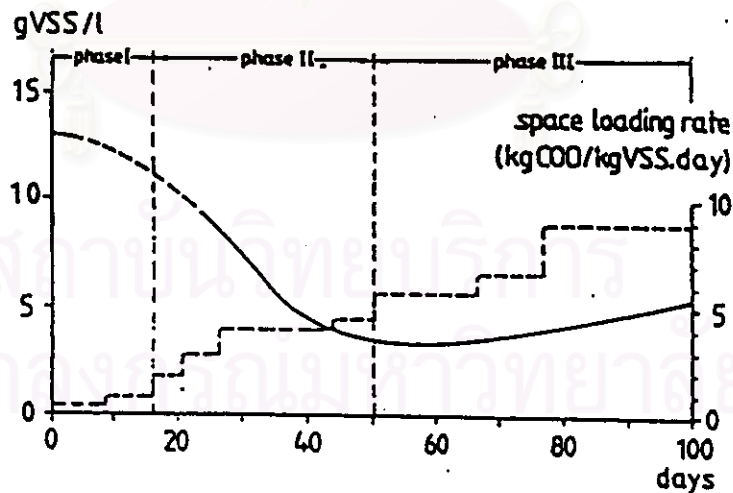
ในการทำงานของระบบอุเอเอสบี จะมีการเติมเชื้อแบคทีเรียเข้าสู่ถังปฏิกริยา จากนั้นทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นและรวมตัวเป็นเม็ดหรือเกล็ด (granular or pellet) ทำให้มีความเร็วในการจมตัวสู่ก้นถังปฏิกริยาสูง รวมเป็นชั้นของตะกอนนอน (sludge bed) ส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่าจะลอยอยู่เป็นชั้นของตะกอนแขวนลอย (sludge blanket)

เมื่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างของถังปฏิกริยา จุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้เกิดเซลล์ และก๊าซขึ้น โดยก๊าซที่เกิดขึ้น (ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน) และความเร็วของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ลอยขึ้นสู่ด้านบน ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนแขวนลอย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อน้ำเสียเคลื่อนที่จนถึงส่วนบนของถังซึ่งมีอุปกรณ์แยกก๊าซ , น้ำเสีย และตะกอนแขวนลอย ทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นถูกแยกไปเก็บยังส่วนบน และไหลไปตามท่อสู่ที่เก็บก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์จะตกลงสู่ก้นถังปฏิกริยา ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกทางด้านบนของถัง

จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญของระบบยูเอเอสบี คือ การเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะเป็นเกล็ด หรือ เม็ด ซึ่งมีความหนาแน่น และน้ำหนักมาก เพื่อที่จะตกตะกอนได้ดี เป็นสิ่งสำคัญของระบบนี้ เพราะถ้าไม่มีการรวมตัวเป็นเม็ด หรือ เกล็ด จะทำให้เกิดการหลุดออก (wash out) ของตะกอน จุลินทรีย์ได้ เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงหรืออาจล้มเหลวได้ นอกจากนี้การป้องกันน้ำเสียที่เข้าระบบไม่ให้เกิดการไหลเป็นช่อง (channelling) ก็เป็นสิ่งสำคัญ เพราะมิฉะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบลดลงได้

2.4.3 กลไกการเกิดเม็ด หรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Pelletization)

Hulshoff-Pol และคณะ (1983) ได้ศึกษากลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยสังเกต จากพฤติกรรมในการคงอยู่ หรือการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ รูปที่ 2.6 แสดงการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ระหว่างขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอน จุลินทรีย์ในถังยูเอเอสบี จากการทดลองของ Hulshoff-Pol และคณะ ได้กล่าวถึงขั้นตอนของ การเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ และภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ ระหว่างขั้นตอน การเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ในถัง UASB (2B) (Hulshoff-Pol et al., 1983)

ขั้นตอนที่ 1 (อัตราการบรรพทุกสารอินทรีย์ < 2 กก.ซีไอดี / ลบ.ม. - วัน)

เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีแล้ว ชั้นตะกอนล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากน้ำเสียที่ป้อนเข้าไปและก๊าซที่เริ่มเกิดในระบบ เกิดจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (filamentous organisms) ซึ่งทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

ขั้นตอนที่ 2 (อัตราการบรรพทุกสารอินทรีย์ 2 - 5 กก.ซีไอดี / ลบ.ม. - วัน)

ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงมาก เนื่องจากการเพิ่มอัตราการบรรพทุกสารอินทรีย์ ทำให้เกิดการผลิดก๊าซมากขึ้น ทำให้มีการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กๆ ออกนอกถัง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ และหนักสามารถคงอยู่ในถังต่อไปได้ ซึ่งเป็นการคัดเลือกของระบบที่มีการสร้างจุลินทรีย์ และมีการรวมตัวของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนจมอยู่ส่วนล่างของถัง เม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มม.

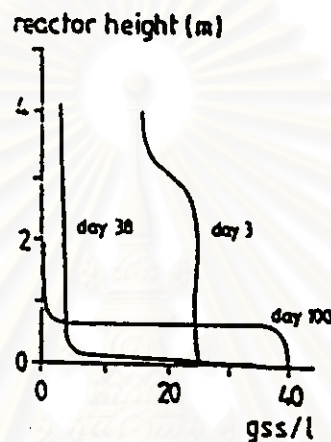
ขั้นตอนที่ 3 (อัตราการบรรพทุกสารอินทรีย์ > 3 - 5 กก.ซีไอดี / ลบ.ม. - วัน)

เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีมากกว่าการหลุดออกนอกถังของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งหลังจากระบบได้ผ่านขั้นตอนนี้แล้ว ระบบจะสามารถรับอัตราการบรรพทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ จากการทดลองที่ผ่านมา ระบบอาจรับได้สูงถึง 50 กก.ซีไอดี / ลบ.ม. - วัน

ลักษณะของการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถัง 3 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งใช้เส้นกราฟความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (g.SS/l) ตามความสูงของถัง แสดงถึงขั้นตอนทั้งสามดังกล่าว

Sam - Soon และคณะ (1987) ทำการทดลองระบบยูเอเอสบี เพื่อศึกษาถึงที่มาและสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้ น้ำแอมโมเนียเป็นน้ำเสีย และให้ข้อสังเกตดังนี้ การเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของ H_2 utilizing methane bacteria ชนิดหนึ่งคือ methanobacterium Strain AZ (M. Strain. AZ) กล่าวคือ ในสภาพแวดล้อมที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง อัตราส่วน ATP / ADP สูง M. Strain. AZ สามารถใช้ H_2 เป็นแหล่งพลังงาน และสร้างกรดอะมิโนที่จำเป็นได้ แต่ไม่สามารถสร้าง cysteine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิด

หนึ่งและมีความสำคัญในการสร้างโปรตีนโพลีเปปไทด์ ทำให้ต้องอาศัย cysteine จากภายนอกเซลล์ ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว และมีปริมาณ $\text{NH}_3\text{-N}$ เพียงพอ รวมทั้งปริมาณ cysteine จากภายนอก มีจำกัด จะทำให้ M Strain. AZ สร้างกรดอะมิโนขึ้นในปริมาณมาก และเมื่อมีปริมาณมากเกินไป ก็จะถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ กรดอะมิโนที่ถูกปล่อยออกมาจะรวมตัวกันเป็น polypeptide ล้อมรอบจุลินทรีย์และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น



รูปที่ 2.7 ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ตามความสูงของถัง UASB (2B), (Hulshoff-Pol et al. , 1983)

Sam - Soon และคณะ (1987 , 1990) ได้สรุปลักษณะสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ดังนี้คือ

- ความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนของระบบต้องมีค่าสูง
- ปริมาณ $\text{NH}_3\text{-N}$ ในระบบต้องมีเพียงพอ
- ปริมาณ cysteine ในระบบต้องมีจำกัด
- ค่าพีเอชในระบบต้องเป็นกลาง
- ลักษณะการไหลของน้ำเสียต้องเป็นลักษณะ plug flow

De Zeeuw , Hilshoff-Pol และ Wiegant ได้กล่าวถึงชนิดของเม็ดตะกอนและปัจจัยของการเกิดเม็ดตะกอนแบบที่เรียแต่ละชนิด ในกระบวนการไร้ออกซิเจน สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้

- เม็ดตะกอนชนิด A (A-type granules) เป็นเม็ดตะกอนที่เกิดจากการรวมตัวกันเองของแบคทีเรีย ได้เม็ดตะกอนทรงกลมแน่น ซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม mathanothrix soehngeni

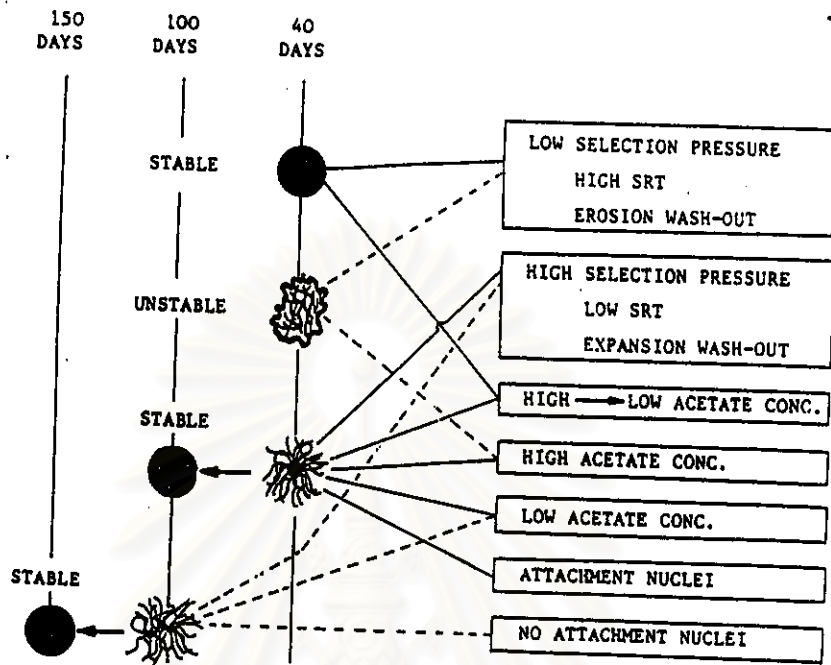
- เม็ดตะกอนชนิด C (C-type granules) เป็นเม็ดตะกอนที่เกิดจากการรวมตัวกันเองของแบคทีเรีย ได้เม็ดตะกอนทรงกลมแน่น ซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่ม *mathanosarcina* ชนิด *acetoclasts*

- เม็ดตะกอนชนิด B (B-type granules) เป็นเม็ดตะกอนที่เกิดจากกลุ่มแบคทีเรีย ไปเกาะติดบนผิวของอนุภาคเฉื่อยขนาดเล็ก (inert particles) และเจริญเติบโตเป็นฟิล์มชีวะหุ้มรอบอนุภาคเฉื่อย จนกลายเป็นเม็ดตะกอนในเวลาต่อมา

รูปที่ 2.8 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลบังคับ ในการเกิดเม็ดตะกอนของตะกอนแบบไร้ออกซิเจน จะเห็นว่าเม็ดตะกอนชนิด A ซึ่งเป็นเม็ดตะกอนที่มีเสถียรภาพ และตกตะกอนได้ดี เกิดขึ้นได้เมื่อกำหนดสภาพภายในระบบให้มี selection pressure ต่ำ (ทั้ง hydraulic loading rate และ gas loading rate) อายุตะกอนสูง (high SRT) และการคัดล้างตะกอนเป็นแบบ erosion (erosion wash-out) พร้อมกับรักษาระดับความเข้มข้นอะซิเตทให้ต่ำ ถ้ารักษาระดับความเข้มข้นอะซิเตทให้สูงจะทำให้เกิดเม็ดตะกอนชนิด C ซึ่งไม่มีเสถียรภาพ ส่วนเม็ดตะกอนชนิด B จะเกิดขึ้นเมื่อกำหนดสภาพภายในระบบให้มี selection pressure สูง อายุตะกอนต่ำ และการคัดล้างตะกอนเป็นแบบ expansion (expansion wash-out) โดยความเข้มข้นอะซิเตทอาจสูงหรือต่ำก็ได้

2.4.4 ผลของตะกอนแขวนลอยต่อเม็ดตะกอน

ตะกอนแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำเสียที่เข้าระบบยูเอเอสบี อาจเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการใช้ระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสีย (Hulshoff-Pol , 1989 ; Lettinga และคณะ , 1985 ; Lin en Yang , 1991 ; Sayed และคณะ , 1988) การสะสมตัวของตะกอนแขวนลอยในชั้นตะกอน และการรวมตัวกันระหว่างตะกอนแขวนลอยกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ส่วนส่งผลกระทบต่อลักษณะของเม็ดตะกอน เช่น สูญเสียความสามารถในการตะกอน (settleability) ขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทนในเม็ดตะกอน (methanogenic activity) และความต้านทานต่อแรงภายนอกของเม็ดตะกอนลดลง



รูปที่ 2.8 ปัจจัยที่มีผลบังคับในการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้ออกซิเจน
(de Zeeuw , Hulshoff-Pol and Wiegant)

ปัญหาที่เกิดจากตะกอนแขวนลอยชนิดต่างๆ อาจแบ่งประเภทได้ดังนี้

- การตกค้างของสารอนินทรีย์ (inorganic material) เช่น อนุภาคดินเหนียวและเม็ดทรายในถังยูเอเอสบี อนุภาคดังกล่าวจะไปแทนที่มวลจุลินทรีย์ในระบบ (Littinga and Hulshoff-Pol , 1991 ; Rozzi and Verstraete , 1981 ; Van Wambeke และคณะ , 1990)
- การรวมตัวกันระหว่างสารอินทรีย์พวกไฟเบอร์ (fibres) กับเม็ดตะกอนจะไปทำให้มวลจุลินทรีย์ในเม็ดตะกอนลดลง
- การเกาะติดผิวอนุภาคอินทรีย์ที่ตกตะกอนไม่ดี โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนที่แขวนลอย (suspended methanogens) จะทำให้การเจริญเติบโตของเม็ดตะกอนลดลง
- การอุดตันผิวเม็ดตะกอนโดยอนุภาคจำพวกไขมัน หรือโปรตีนจะทำให้สารอาหารซึมผ่านสู่ภายในเม็ดตะกอนได้ยาก และไปขัดขวางการปล่อยก๊าซชีวภาพออกจากเม็ดตะกอน
- การย่อยสลายอนุภาคอินทรีย์บนผิวเม็ดตะกอน อาจทำให้เกิดแบคทีเรียสร้างกรดเจริญเติบโตอยู่บนผิวเม็ดตะกอน ลักษณะผิวเม็ดตะกอนเปลี่ยนไป

- การดูดติดผิวเม็ดตะกอนโดยสารอินทรีย์ความหนาแน่นต่ำ ทำให้เกิดการหลุดออกของเม็ดตะกอน (Rinzema และคณะ , 1969 ; Sayed และคณะ , 1988) และ/หรือ ก่อให้เกิดชั้นผิวของเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นต่ำ แบคทีเรียสร้างกรดชนิดแขวนลอย (suspended acidogenic bacteria) มักปรากฏอยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการสร้างกรดมาก่อนในรูปตะกอนแขวนลอย ฉะนั้นการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการสร้างกรดมาก่อนจึงไม่ควรละเลยปัญหาที่อาจเกิดจากตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียดังได้กล่าวข้างต้น

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

2.5.1 อุณหภูมิ (temperature)

ระบบยูเอเอสบีสามารถแบ่งช่วงการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 3 ช่วง คือ

- ช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิก (thermophilic) มีอุณหภูมิประมาณ 50-65 °ซ.
- ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิก (mesophilic) มีอุณหภูมิประมาณ 20-45 °ซ.
- ช่วงการทำงานไซโคฟิลิก (psychrophilic) มีอุณหภูมิประมาณ 20 °ซ.

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิก จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิก แต่นิยมให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากพบว่าพวกเทอร์โมฟิลิกจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า ส่วนช่วงไซโคฟิลิก ถ้าขมิเหนเกิดขึ้นน้อยมาก และในส่วนของ การย่อยสลาย (hydrolysis) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ. ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่า ที่จะให้มีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด

2.5.2 พีเอช , สภาพความเป็นด่าง,กรดไขมันระเหย (pH,alkalinity,volatile fatty acid)

ค่าพีเอช , สภาพความเป็นด่าง , และกรดไขมันระเหย มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 6.8 - 7.2 ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด มักสามารถปรับตัวได้

ในช่วงที่มีพีเอชกว้างกว่า คือประมาณ 5 - 8.5 ดังนั้นค่าพีเอชจึงมีความสำคัญต่อแบคทีเรียที่ผลิต มีเทนมากกว่า กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยพวกแบคทีเรียที่สร้างกรด ปกติควรมีค่าอยู่ในระบบ ประมาณ 200 - 400 มก./ล. ในรูปของกรดอะซิติก โดยถ้าปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะเป็นสัญญาณแสดงว่าระบบเสถียร สมบูรณ์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันเพิ่มขึ้นมากกว่า 1000 มก./ล. จะแสดงความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ สภาพความเป็นต่างในรูป ไบคาร์บอเนต จะเป็นตัวแสดงให้ทราบถึงกำลังบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ของระบบ ถ้ากำลัง บัฟเฟอร์ต่ำไม่พอเพียง ปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง อย่างรวดเร็ว ซึ่งสภาพดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้น ถ้ามีกำลังของบัฟเฟอร์มากพอ โดยทั่วไปในการบำบัด แบบไร้ออกซิเจน ควรมีค่าสภาพความเป็นต่างประมาณ 2000 - 5000 มก./ล. และอัตราส่วนความ เข้มข้นของกรดไขมันระเหย (มก./ล. ในรูปกรดอะซิติก) ต่อสภาพความเป็นต่างไบคาร์บอเนต (มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) ซึ่งเป็นการแสดงค่ากำลังของบัฟเฟอร์ทางหนึ่ง โดยถ้าอัตรา ส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ามีกำลังของบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 0.8 แสดงว่ามีกำลังของบัฟเฟอร์ต่ำ อาจทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลงได้

สารเคมีที่ใช้ในการควบคุมพีเอช ได้แก่ การเติมด่างแก่ไบคาร์บอเนต หรือ คาร์บอเนตให้ แก่ระบบ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เติมให้ระบบ เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ซึ่งเป็นสารที่ ละลายน้ำได้ดี เป็นการเติมไบคาร์บอเนตให้แก่ระบบโดยตรง แต่ราคามักจะสูงกว่าสารอื่น

2.5.3 สารอาหารเสริม (nutrient)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนมีข้อดีอย่างหนึ่งคือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมา น้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำกว่า McCarty กล่าวไว้ว่า จุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในการย่อยสลาย สารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน BOD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 ในปัจจุบัน พบว่าแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ มีฉะนั้นระบบไม่ อาจดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพได้ ธาตุดังกล่าวได้แก่ เหล็ก , โคบอลท์ , นิกเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ตามการเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียลำบาก เนื่องจากซัลไฟด์ สามารถทำให้โลหะต่างๆ ตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ เช่น เหล็กรวมกับซัลไฟด์เป็นผลึกที่ไม่ละลาย

น้ำ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยเติม yeast extract หรือ milorganite ให้แก่ระบบโดยตรง

2.5.4 สารพิษ (toxic materials)

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยา ไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ เพราะจะไปรบกวนการทำงานของแบคทีเรียในระบบ หรือยับยั้งการเจริญเติบโต โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ ความรุนแรงของพิษย่อมขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นๆ ด้วย สารที่เป็นพิษต่อระบบได้แก่

พิษของอิออนบวกกับโลหะหนัก

อิออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนได้แก่ โซเดียม โปตัสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ซึ่งธาตุเหล่านี้โดยปกติ ในระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นจะเกิดเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ปกติอิออนบวกที่มีวาเลนซ์สูง จะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก (McCarty , 1964)

ชนิดอิออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ ล.)		
	กระตุ้นพิษ	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na ⁺	100 -200	3,500 - 5,500	8,000
K ⁺	200 - 400	2,500 - 4,500	12,000
Ca ²⁺	100 - 200	2,500 - 4,500	8,000
Mg ²⁺	75 - 150	1,000 - 1,500	3,000

พิษของไอออน สามารถลดความเป็นพิษลงได้ (antagonism) เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ ในปริมาณที่พอเหมาะ เช่น พิษของ Na^+ มีความเข้มข้น 3500 มก/ล. สามารถทำให้ลดลงได้ ถ้ามี Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมอยู่ระหว่าง 50 -1000 มก/ล. แต่ในทางตรงกันข้าม ไอออนบางชนิดจะไปเพิ่มความเข้มข้นให้มากขึ้น เมื่ออยู่ร่วมกัน (synergism)

การยับยั้งจากโลหะหนัก มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน Mosey และ Hughes (1975) ศึกษาพบว่า Cu^{2+} มีผลต่อระบบมากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลยับยั้ง 50% ของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Mosey , and Hughes , 1975)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก./ล.)
Fe^{2+}	1 - 10
Zn^{2+}	10^{-4}
Cd^{2+}	10^{-7}
Cu^+	10^{-12}
Cu^{2+}	10^{-16}

ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเป็นเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ดี โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับแบคทีเรีย แม้จะในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม

พิษของกรดไขมันระเหย

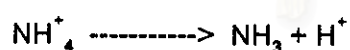
กรดไขมันระเหยถ้าถูกสร้างมากเกินไป เช่น ในสภาวะที่สารอินทรีย์หรืออาหารเข้ามามาก แบคทีเรียที่ผลิตกรดจะผลิตกรดไขมันระเหยออกมามาก หากพบว่าระบบมีกำลังของบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ ตารางที่ 2.5 แสดงความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยที่มีผลยับยั้ง 50% ของแบคทีเรียสร้างมีเทน

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยที่มีผลยับยั้ง 50% ของแบคทีเรียสร้างมีเทน
(Hulshoff-Pol , 1994)

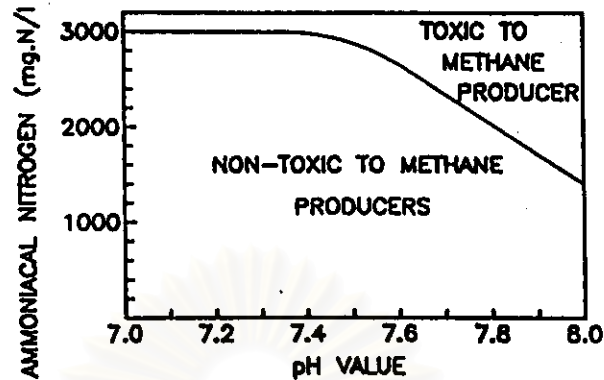
พีเอช	กรดอะซิติก (มก.ซีไอดี/ลิตร)	กรดไพรูวอิก (มก.ซีไอดี/ลิตร)
5.0	44	13
5.5	106	30
6.0	300	80
6.5	912	241
7.0	2,851	745
7.5	8,376	2,358
8.0	28,368	7,398

พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในน้ำเสียของระบบไร้ออกซิเจน มาจากการย่อยสลายพวกโปรตีน โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และแอมโมเนีย (NH_3) ดังสมการ



โดยปริมาณของแอมโมเนียมไอออนนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือ ที่พีเอชประมาณ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1 % ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน 99% แต่ถ้าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ปฏิกริยาจะไปทางขวามือมากขึ้น ทำให้เกิดแอมโมเนียมาก ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย คือ มากกว่า 150 มก./ล. ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง 3,000 มก./ล. ดังนั้นการรักษาพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 หรือต่ำกว่า จะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า รูปที่ 2.9 แสดงความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนและพีเอชต่อระบบ ตารางที่ 2.6 แสดงผลของความเข้มข้น



Max. Safe Limit NH_4^+ = 3000 mg.N/l Max. Safe Limit NH_3 = 150 mg.N/l

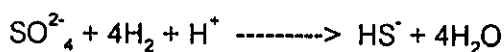
รูปที่ 2.9 ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลกระทบต่อระบบ
(Meynell, 1976)

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบไร้ออกซิเจน
(McCarty, 1964)

แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)	ผลกระทบต่อระบบ
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 - 1,000	ยังไม่เกิดผลชัด
1,500 - 3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

2.5.5 ผลของซัลเฟตต่อระบบยูเอเอสบี

การที่น้ำเสียมีปริมาณซัลเฟตมาก จะทำให้มีแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้โดยกลุ่มของ Sulfate - reducing bacteria (SRB) เช่น Desulfovibrio, Desulfotomaculum จะสามารถใช้ซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายได้ โดยซัลเฟตจะถูกเปลี่ยนไปเป็นซัลไฟด์ได้ดังสมการ



โดยแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต จะแย่งอาหารกันกับพวกสร้างมีเทน โดยสามารถใช้อะซิเตท และไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร และสามารถชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ ทำให้ผลผลิตที่เป็นก๊าซมีเทนลดน้อยลง นอกจากนี้การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ถ้ามีปริมาณมากเกินไป Cappenbeg พบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนจะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ ถ้ามี H_2S เท่ากับ 0.1 nM อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาในแง่การใช้ไฮโดรเจน เป็นสารอาหารของแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต จะทำงานสัมพันธ์กันกับแบคทีเรียสร้างไฮโดรเจน โดยจะช่วยในการทำให้ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเสมอเป็นการลดการสะสมตัวของก๊าซไฮโดรเจนทางหนึ่ง ดังนั้นแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟตจึงมีบทบาทต่อการสร้างกรดไขมันระเหย และมีผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไพรูวอิกอีกด้วย ตารางที่ 2.7 แสดงสมการรีดิวซ์ซัลเฟตและการผลิตมีเทน

ตารางที่ 2.7 สมการรีดิวซ์ซัลเฟตและการผลิตมีเทน

(Widdel , 1988 ; Thauer et al. , 1977 and Dolfing , 1988)

Reaction	ΔG° (kJ/react.)
Hydrogen - consuming	
By H-SRB $4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow HS^- + 4H_2O$	-152.2* (1)
By H-MPB $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135.6* (2)
Acetate - consuming	
By A-SRB $CH_3COO^- + SO_4^{2-} \longrightarrow HS^- + 2HCO_3^-$	-47.6* (3)
By A-MBP $CH_3COO^- + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3^-$	-31.0* (4)
Propionate - consuming	
By propionate-degrading SRB or by proton-reducing acetogen(PRA) with H-SRB:	
$4CH_3CH_2COO^- + 3SO_4^{2-} \longrightarrow 4CH_3COO^- + 4HCO_3^- + 3HS^- + H^+$	-150.6* (5)
By PRA:	
$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \longrightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$	-76.1* (6)
By PRA with H-MPB:	
$4CH_3CH_2COO^- + 12H_2O \longrightarrow 4CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3CH_4$	-102.4# (7)

2.6 เกณฑ์การออกแบบ

2.6.1 เกณฑ์การออกแบบถังสร้างกรด

Lettinga และ Hulshoff (1991) แนะนำให้ใช้ถังกวนผสมอย่างสมบูรณ์ เป็นถังสร้างกรด และถังปรับสภาพ (balancing tank) ที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถดัดแปลงนำมาใช้เป็นถังสร้างกรดได้ Alexiou และคณะ (1991) แนะนำให้ใช้ถังสร้างกรดเป็นแบบง่ายที่สุดทั้งในด้านการออกแบบและการดำเนินการ เพื่อหลีกเลี่ยงการลงทุนและค่าดำเนินการที่สูง

2.6.1.1 อุณหภูมิและพีเอช

อุณหภูมิที่เหมาะสมของถังสร้างกรดขึ้นกับค่าพีเอชที่จะเลือกใช้ Zoetemeyer และ คณะ (1982a, 1982b) กล่าวว่า อุณหภูมิของถังสร้างกรดควรอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค หรือ เทอร์โมฟิลิค โดยที่ช่วงมีโซฟิลิคจะมีส่วนประกอบของกรดคงที่กว่า โดยส่วนประกอบของกรดจะขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราส่วนการเจือจาง ค่าพีเอชที่เหมาะสมของถังกรดอยู่ระหว่าง 5.8 - 6.2 ขณะที่ Cohen และ คณะ (1980) กล่าวว่า ค่าพีเอชของถังสร้างมีเทนควรอยู่ระหว่าง 7.0 - 7.2 และอัตราการสร้างกรดจะลดลงอย่างรวดเร็วที่พีเอชต่ำกว่า 5 (Lettinga et.al, 1991)

2.6.1.2 ระยะเวลาพักน้ำ

Lettinga และ Hulshoff (1991) แนะนำว่าระยะเวลาพักน้ำในถังสร้างกรด ควรอยู่ระหว่าง 6 - 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำเสีย โดยเลือกระยะเวลาการพักน้ำที่ทำให้เกิดการหมักกรด 20 - 40 % การทำให้เกิดกรดโดยสมบูรณ์ไม่ใช่สิ่งจำเป็น ทำให้ต้องเสียเงินลงทุนและเสียค่าดำเนินการสูงขึ้น และยังเป็นผลเสียต่อระบบ เพราะอาจมีแบคทีเรียสร้างกรดจำนวนมากปนเข้าไปในถังสร้างมีเทน ทำให้เกิดผลเสียต่อเมื่อดตะกอน และการทำงานของระบบได้

การเลือกเวลากักน้ำของถังสร้างกรด ขึ้นกับระยะเวลาที่ทำให้เกิดปริมาณกรดที่เหมาะสมคือ ไม่ก่อให้เกิดผลเสียกับระบบสร้างมีเทนในขั้นต่อไป โดยต้องคำนึงถึงระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมาก แต่ปริมาณกรดที่ได้ไม่แตกต่างกันนักด้วย เช่น Alexiou และ คณะ (1994) พบว่าเวลากักน้ำเสีย

ในถังสร้างกรดจากการผลิตกาแฟ 24 ชั่วโมง จะเกิดกรด 50 % ในขณะที่เวลากักน้ำ 6 ชั่วโมง จะเกิดกรด 40 % การลดเวลากักน้ำส่งผลให้ขนาดถังสร้างกรดลดลง เป็นการประหยัดการลงทุนทางหนึ่ง ดังนั้นการศึกษาระยะเวลากักน้ำที่เหมาะสม สำหรับน้ำเสียแต่ละชนิดเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบถังสร้างกรด สำหรับการใช้งานจริงต่อไป

เกณฑ์การออกแบบถังสร้างกรดไม่มีข้อกำหนดตายตัว ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบอาศัยจากการศึกษาที่ผ่านมา โดยขึ้นกับลักษณะและชนิดของน้ำเสียแต่ละประเภท ค่าพารามิเตอร์ของถังสร้างกรดที่ใช้ในการศึกษาต่างๆที่ผ่านมาแสดงในตารางที่ 2.8 จากการศึกษาต่างๆที่ผ่านมา พบว่าเวลากักน้ำที่เหมาะสมส่วนใหญ่จะน้อยกว่า 12 ชั่วโมง (Alexiou และคณะ, 1994)

2.6.2 เกณฑ์การออกแบบถังยูเอเอสบี

Lettinga และ Hulshoff (1991) ได้แนะนำเกณฑ์การออกแบบถังยูเอเอสบีไว้ดังนี้

2.6.2.1 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate)

สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรม อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (ในเทอมซีโอดีที่สามารถย่อยสลายทางชีวะได้) เป็นปัจจัยที่ใช้ควบคุมขนาดของถัง อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์นี้ขึ้นกับประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรีย (sludge activity) อุณหภูมิ และลักษณะของน้ำเสีย ปริมาตรถังสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_r = (C * Q) / B_v$$

เมื่อ V_r คือ ปริมาตรถัง , ลบ.ม.

C คือ ความเข้มข้นน้ำเสีย , กก./ลบ.ม.

Q คือ อัตราการไหลของน้ำเสีย , ลบ.ม./วัน

B_v คือ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ , กก./ลบ.ม.-วัน

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบถังสร้างกรด จากการศึกษาที่ผ่านมาสำหรับ
น้ำเสียประเภทต่างๆในระบบบำบัดไร้ออกซิเจน

ประเภทน้ำเสีย	พีเอช	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลากักน้ำ (ชั่วโมง)	การเกิด กรด	อ้างอิง
กลูโคส	6.0	37	-	-	Zoetemeyer (1982a, 1982b)
น้ำตาล	5.8	30	24	-	Alphenaar (1994)
	4.8	30	3	-	Lettinga (1980)
	4.5-4.7	30-32	12	1200 mg/l	Lwin (1996)
แป้งมันสำปะหลัง	7	37	24	-	ธาดา ชัตรธานี (1987)
	6.0	37	6	40-50%	Alexiou (1994)
กาแฟ	4.5	45	3	-	Kozuchowska (1995)
	4.0-5.0	35-37	4.7	60%	Yoda (1997)
กากน้ำตาล	6	35	3.4	50%	Romli (1994)
	-	18	4	-	Sayed (1993)
น้ำเสียชุมชน	-	-	-	-	-
เนยแข็ง	6.5	-	-	23-28%	Malaspina F. (1996)
	4.5	35	9.6	70%	Garcia P.A.(1991)
โรงเบียร์	5.9 \pm 0.3	32	7 \pm 2	20%	Stadlbauer (1994)
มูลหมู	-	36	4 วัน	-	Cseh T. (1984)
นมผง	5.0-5.5	35	12	85%	Anderson (1994)
แป้ง	6.2	35 \pm 2	12	67%	Zhang (1994)

จากตารางที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ที่เป็นไปได้กับ อุณหภูมิในการเดินระบบ ที่ความเข้มข้นตะกอนเท่ากับ 25 กก.ในรูปของแข็งระเหยแขวนลอย / ลบ.ม.

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์กับอุณหภูมิ สำหรับการเดินระบบ ยูเอเอสบี (Lettinga and Hulshoff, 1991)

อุณหภูมิ (°ซ)	อัตราภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์(กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)		การกำจัดตะกอน แขวนลอย
	ในรูปสารอินทรีย์ ละลาย	30 % ของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป ตะกอนแขวนลอย	
15	1.5-3	1.5-2	พอใช้ได้
20	2-4	2-3	พอใช้ได้
25	4-8	3-6	ปานกลาง
30	8-12	6-9	พอสมควร
35	12-18	9-14	ค่อนข้างต่ำ
40	15-24	14-18	ต่ำ

สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ปริมาตรถังจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นน้ำเสีย แต่ขึ้นอยู่กับ ปัจจัยมากมายเช่น ลักษณะและส่วนประกอบของน้ำเสีย และสามารถหาปริมาตรถังได้ดังสมการต่อไปนี

$$V_r = \tau * Q$$

เมื่อ τ คือ เวลาพักน้ำ, วัน

ส่วนน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการตกตะกอนก่อน เวลาพักน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2 .10 เวลาพักน้ำสำหรับน้ำเสียชุมชนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ

(Lettinga and Hulshoff ,1991)

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลาพักน้ำ (ชม.)
16-19	10-14
22-26	7-9
> 26	6

2.6.2.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของถัง

พื้นที่หน้าตัดและความสูงของถัง

ความสูงของถังยูเอเอสบี เป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากความสูงที่มากไปจะทำให้สิ้นเปลืองค่าก่อสร้างโดยไม่จำเป็น ถ้าน้อยไปจะทำให้ไม่สามารถกักเก็บตะกอนไว้ได้ แนวทางในการกำหนดความสูงของถังมีดังนี้

- น้ำเสียละลาย 10 ม.
- น้ำเสียละลายบางส่วน 3-5 ม.
- ซีโอดีเกิน 3000 มก./ล. 5-7 ม.

จากค่าความสูงของถัง , เวลาพักน้ำ และอัตราการไหลของน้ำเสียสามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดของถังหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A = \tau \cdot Q / H$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดถัง , ตร.ม.

H คือความสูงถัง , ม.

ความเร็วไหลชั้น (Admissible superficial velocity)

ความเร็วไหลชั้นเป็นปัจจัยอีกตัวหนึ่ง ซึ่งสัมพันธ์กับความสูงของถัง ความเร็วที่พอเหมาะ จะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับเม็ดตะกอนเกิดขึ้นอย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพ ความเร็วไหลชั้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_s = H / \tau$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วไหลชั้น ม./ชม.

ค่าความเร็วไหลชั้นคิดจากพื้นที่ผิวเปียก (wet surface area) ในส่วนตกตะกอนของถัง ยูเอเอสบี และขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะน้ำเสียและประเภทของตะกอนเป็นสำคัญ สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|
| - น้ำเสียละลาย | 3 | ม./ชม. |
| - น้ำเสียละลายบางส่วน | 1-1.25 | ม./ชม. |
| - ตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่ค่อยเป็นเม็ด | 0.5 | ม./ชม. |

ระบบป้อนน้ำเข้า (feed inlet system)

ระบบการกระจายน้ำเข้าระบบเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง ของถังยูเอเอสบีทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียและตะกอนอย่างเหมาะสมและทั่วถึง ต้องกระจายน้ำเสียได้ทั่วถึงตลอดหน้าตัด ไม่ทำให้เกิดการไหลเป็นช่อง (channeling) ของน้ำเสียในชั้นตะกอนและเกิดบริเวณจุดบอด (dead corners) ในถังยูเอเอสบี ตารางที่ 2.11 แสดงจำนวนจุดป้อนน้ำเข้าที่ต้องการ

อุปกรณ์แยกสามสถานะ (GSS device)

เพื่อรักษาตะกอนให้อยู่ในระบบได้มากที่สุด อุปกรณ์แยกสามสถานะเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องติดตั้งในถังยูเอเอสบี วัตถุประสงค์ของอุปกรณ์แยกสามสถานะ คือ

ตารางที่ 2.11 จำนวนจุดป้อนน้ำเข้าที่ต้องการในถังยูเอเอสบี

(Lettinga and Hulshoff ,1991)

ชนิดตะกอน	พื้นที่ต่อจุด (ตร.ม.)	อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)
- ตะกอนลักษณะเป็นฟล็อกหนาแน่น (> 40 กก. ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ /ลบ.ม.)	0.5-1 1 - 2 2 - 3	<1 1 - 2 >2
- ตะกอนลักษณะเป็นฟล็อกหนาแน่นปานกลาง (20-40 กก. ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ/ลบ.ม.)	1-2 2-5	<1-2 >3
- ตะกอนเม็ด	0.5 0.5-2 >2	<2 2-4 >4

- เพื่อแยกและระบายก๊าซชีวภาพออกจากถัง
- เพื่อป้องกันการหลุดออกของเม็ดตะกอน
- ช่วยให้ตะกอนที่ตกตะกอนกลับลงสู่ส่วนล่างของถัง
- เพื่อป้องกันการขยายตัวมากเกินไปของชั้นตะกอนและหลุดเข้าไปในส่วนตกตะกอน
- เพื่อให้ได้น้ำออกที่ใสขึ้น

เกณฑ์ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับการสร้างอุปกรณ์แบบสามสถานะมีดังนี้

- ความลาดชันของกันส่วนตกตะกอนควรจะมีค่าระหว่าง 45-60°
- พื้นที่ผิวของช่องว่างระหว่างที่เก็บก๊าซควรจะมีค่า 15-20 % ของพื้นที่ผิวของถัง
- ความสูงของที่เก็บก๊าซควรจะมีค่า 1.5-2 ม. ที่ความสูงถังเท่ากับ 5-7 ม.
- พื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซควรอยู่ภายในที่รวบรวมก๊าซ เพื่อที่จะทำให้การเก็บรวบรวมและการระบายฟองก๊าซได้ง่าย และป้องกันการเกิดชั้นสกัม
- การซ้อนทับแผ่นกันควรติดตั้งให้ต่ำกว่าช่องระบายก๊าซชีวภาพ 10-20 ซม. เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซชีวภาพหลุดเข้าสู่ส่วนตกตะกอน

- แผ่นกันป้องกันชั้นสก็มควรติดตั้งตอนหน้าของเวียร์น้ำออก
- ขนาดของท่อนำก๊าซชีวภาพต้องมีขนาดใหญ่ พอที่จะระบายก๊าซชีวภาพออกจากที่เก็บก๊าซ โดยเฉพาะกรณีของการเกิดฟองจำนวนมาก
- ในส่วนบนของที่เก็บก๊าซ ควรมีการติดตั้งหัวฉีดสเปรย์น้ำ ในกรณีการบำบัดน้ำเสียที่ก่อให้เกิดฟองมาก เพื่อลดจำนวนฟอง

การระบายตะกอน (sludge discharge)

การออกแบบให้มีการระบายตะกอนส่วนเกินจากถังเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันของตะกอนในถังหนาแน่นเกินไป โดยทั่วไปตำแหน่งที่เหมาะสมควรอยู่ที่กึ่งกลางของความสูงถัง การระบายตะกอนส่วนเกินควรจะทำจากส่วนบนของชั้นตะกอน เพื่อป้องกันการสูญเสียเม็ดตะกอน

อุปกรณ์สำหรับการหมุนเวียนน้ำออก

สำหรับน้ำเสียที่เข้มข้นสูง การหมุนเวียนน้ำออกกลับเข้าสู่ถังใหม่ เพื่อเจือจางระดับซีโอดีในน้ำเข้าให้ต่ำกว่า 15 ก./ล. เป็นสิ่งควรคำนึงถึง เพราะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายสารบัพเฟอร์และเป็นการเพิ่มการสัมผัสระหว่างตะกอนกับน้ำเสีย

วัสดุที่ใช้ก่อสร้าง

จากการใช้ระบบยูเอเอสบีขนาดจริงที่ผ่านมาในประเทศเนเธอร์แลนด์ แสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนเป็นปัญหาหลัก โดยเฉพาะที่ส่วนบนสุดของถังยูเอเอสบี ที่ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต โดยก๊าซออกซิเจน ซึ่งนำไปสู่การมีค่าพีเอชต่ำ ทั้งคอนกรีตและโลหะเหล็กจะถูกกัดกร่อนทั้งสิ้น เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว วัสดุที่ใช้ก่อสร้างและป้องกันการกัดกร่อนได้ ควรเป็นเหล็กสแตนเลส หรือ พลาสติก หรือ การเคลือบวัสดุด้วยวัสดุเฉพาะบางชนิด

2.7 การศึกษาที่ผ่านมา

H , -S. Shin และคณะ (1992) ได้ทดลองใช้ระบบยูเอเอสบีแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นถังสร้างกรด ขั้นตอนที่สองเป็นถังสร้างมีเทน ทดลองบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูงจากโรงกลั่นสุรา มีการปรับค่าพีเอชในแต่ละถัง ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียมักเท่ากับ 4.1 ก./ล. โดยถังสร้างกรดรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 16.5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และผลิตกรดอะซิติกเท่ากับ 3.9 ก./ล.-วัน ส่วนถังสร้างมีเทน รับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 44 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ระบบสามารถลดค่าซีไอดีได้ 80 % และผลิตก๊าซชีวภาพได้ 16.5 ล./ล.-วัน หลังจากเกิดเม็ดตะกอนในถัง 2 ถังแล้ว การรักษาค่าพีเอชของถังสร้างกรดให้เหมาะสมได้ โดยการหมุนเวียนน้ำออกจากถังสร้างมีเทนกลับมาถังสร้างกรด โดยไม่ต้องเติมปริมาณต่าง จากการศึกษานิตแบคทีเรียในเม็ดตะกอน พบว่าเม็ดตะกอนในถังสร้างกรดมีลักษณะรูปร่างและสีที่แตกต่างกัน ในระยะเวลา 90 วัน และในถังสร้างมีเทนในระยะเวลา 120 วัน หลังจากเริ่มต้นเดินระบบ พบว่าเม็ดตะกอนของแบคทีเรียสร้างกรดส่วนใหญ่ประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีรูปร่างอ้วนสั้นต่อกันเป็นสายโซ่ยาว และพวกรูปร่างกลมหลายขนาด ขณะที่พวกเส้นใยยาวคล้าย methanothrix มีแพร่หลายในเม็ดตะกอนของแบคทีเรียสร้างมีเทน และยังพบว่าแบคทีเรียอีกหลายชนิดภายในเม็ดตะกอน

Herbert , H.P. และคณะ (1995) ทำการทดลองโดยใช้ระบบยูเอเอสบี บำบัดน้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยเข้มข้นผสม พบว่าที่อุณหภูมิ 37 °ซ. ระบบสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 24 ก.ซีไอดี/ล.-วัน โดยมีค่าอัตราส่วน F/M เท่ากับ 0.78 กรัมซีไอดี/กรัมของแข็งระเหยแขวนลอย-วัน สามารถกำจัดซีไอดีได้ 97 - 99 % และได้แนะนำว่า การทำให้น้ำเสียเกิดกรดก่อนเข้าระบบยูเอเอสบี จะสามารถบำบัดน้ำเสียได้มากมายหลายประเภท และมีประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจะลดลงเมื่อค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้น และ 92.6 % ของซีไอดีที่ถูกกำจัดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรีย ด้วยค่ายิลด์ (yield) เฉลี่ยเท่ากับ 0.054 กรัมของแข็งระเหยแขวนลอย/กรัมซีไอดี ได้เม็ดตะกอนมีขนาด 1 - 2 มม. และตกตะกอนได้ดี แต่ละกรัมของเม็ดตะกอนสามารถเปลี่ยนซีไอดี 0.86 กรัมให้เป็นก๊าซมีเทน และเม็ดตะกอนจะมีผิวเป็นปุย ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแบคทีเรียชนิดเส้นใยพวก methanothrix

เนตรนภา ศรีสุวรรณพงศ์ (2539) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนีย
 สำปะหลังด้วยระบบยูเอเอสบี 3 แบบคือ ถังยูเอเอสบีชุดที่ 1 ไม่มีถังกรวดแต่มีการหมุนเวียนน้ำ
 กลับ ถังยูเอเอสบีชุดที่ 2 มีถังสร้างกรวดและมีการหมุนเวียนน้ำกลับ ถังยูเอเอสบีชุดที่ 3 มีถังสร้าง
 กรวดแต่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ โดยถังสร้างกรวดมีเวลากักน้ำ 12 ชั่วโมง และอัตราส่วนการหมุน
 เวียนกลับเท่ากับ 5:1 พบว่า ที่อัตราการระบบรทุกสารอินทรีย์ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังยูเอเอสบีชุด
 ที่ 1 , 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 81 , 89 และ 84 % อัตราการผลิตก๊าซเท่ากับ
 0.9 , 2.4 และ 2.9 ลิตร/วัน อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.09 , 0.28 และ 0.31 ลิตร/กรัมซีโอดีที่
 ถูกกำจัด ตามลำดับ ที่อัตราการระบบรทุกสารอินทรีย์ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ถังยูเอเอสบีชุดที่ 1 ,
 2 และ 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 73 , 85 และ 81 % อัตราการผลิตก๊าซเท่ากับ 2.2 ,
 4.4 และ 4.9 ลิตร/วัน อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.12 , 0.32 และ 0.33 ลิตร/กรัมซีโอดีที่ถูก
 กำจัด ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังสร้างกรวดที่อัตราการระบบรทุกสารอินทรีย์ 5
 และ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เท่ากับ 15 % และ 26 % ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย