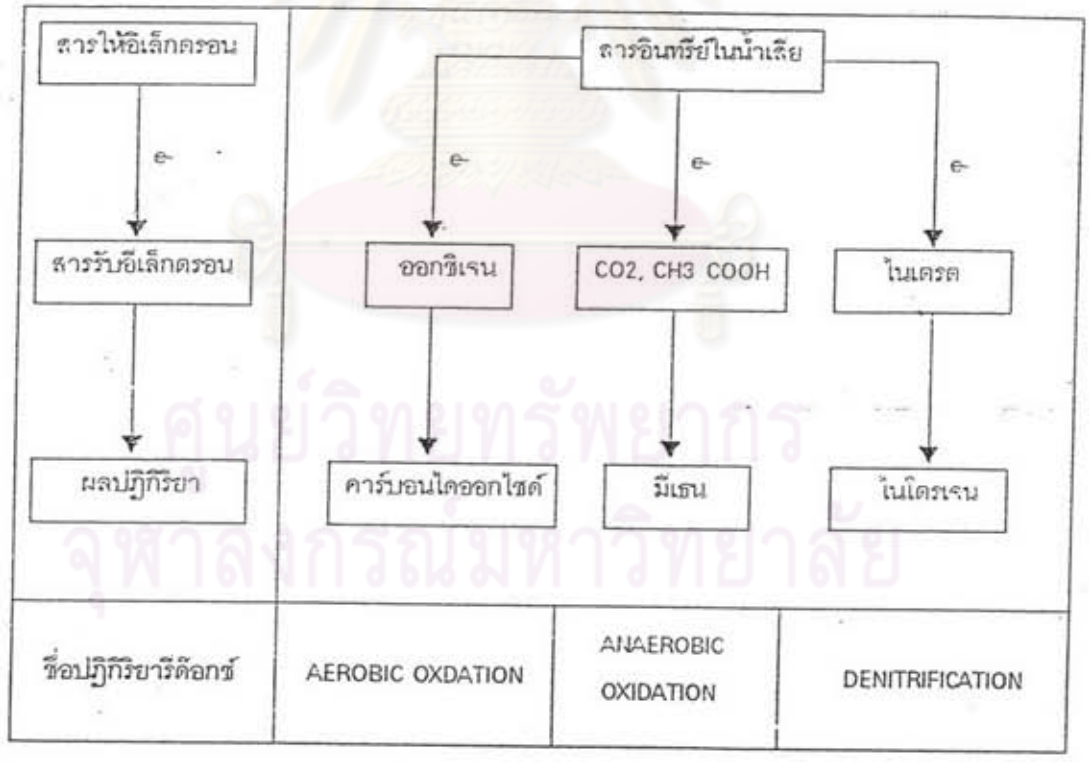
บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวความคิด

3.1 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จะมีปฏิกิริยาที่เกิดการถ่ายเทอิเลคตรอน ระหว่างสารที่ให้อิเลคตรอน และสารที่รับอิเลคตรอน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดัคชัน หรือรีด็อกซ์ โดยที่ สารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งมีพลังงานสูงจะเป็นสารให้อิเลคตรอน และมีสารอย่างอื่นเป็นตัวรับอิเลคตรอน ถ้าปฏิกิริยาเป็นแบบใช้ออกซิเจน สารที่รับอิเลคตรอนคือ ออกซิเจน แต่ถ้าสารที่รับอิเลคตรอนเป็นสารอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไนเตรท ปฏิกิริยาก็จะเป็นแบบไร้ออกซิเจน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงปฏิกิริยารีด็อกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย [5]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรท และไขมันซึ่งอยู่ทั้งในรูปของของแข็ง และสารละลาย สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

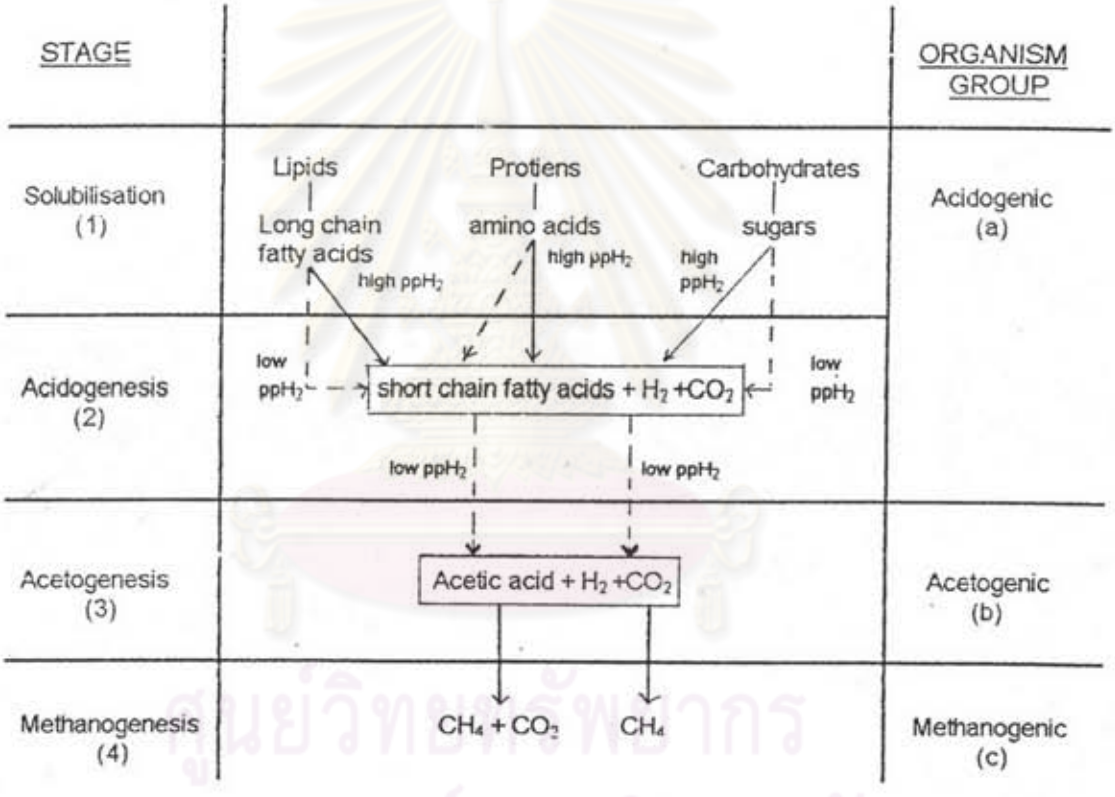
ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation หรือ hydrolysis

ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis

ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้ออกซิเจน [47]

ขั้นตอนที่ 1 Solubilisation หรือ hydrolysis

เป็นขั้นตอนที่สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และซับซ้อน เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรท และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ ที่ถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยแบคทีเรียหลายจำพวก แต่ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acidogenic) ทำให้ได้สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น กรดอะมิโน กลูโคส เป็นต้น เพื่อให้แบคทีเรียสามารถดูดซึมเข้าไปในเซลล์ได้ ในการย่อยสลายของขั้นตอนนี้ มักขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย โดยเอนไซม์จะไปลดพลังงานกระตุ้น (activation energy) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เอนไซม์ก็มีความเฉพาะเจาะจงมาก โดยเลือกเร่งเฉพาะชนิดของปฏิกิริยา และชนิดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา และการทำงานของเอนไซม์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้น การย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิด จึงใช้เวลาต่างกัน

ขั้นตอนที่ 2 Acidogenesis

เป็นขั้นตอนที่นำผลผลิตจากขั้นตอนที่ 1 ดูดซึมเข้าไปในเซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหาร โดยเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพพิออนิก (Propionic acid) กรดบิวทิริก (Butyric acid) เป็นต้น รวมทั้งได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งผลผลิตในขั้นตอนนี้ว่าจะเกิดสารชนิดใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ชนิดของสารที่ผ่านมาจากขั้นตอนที่ 1 และ hydrogen partial pressure (ppH_2) โดยผลของปฏิกิริยาที่ได้จะแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในการย่อยสลายของกลูโคสโดยผ่านวิถีทางชีวเคมีที่เรียกว่า Embden - Meyerhof pathway ในสภาวะที่ low hydrogen partial pressure จะได้ผลผลิตคือ กรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในสภาวะ high hydrogen partial pressure จะได้กรดอะซิติก กรดโพรพิออนิค คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการข้างล่าง

สภาวะ Low hydrogen partial pressure

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

สภาวะ High hydrogen partial pressure

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + CO_2 + H_2$$

ขั้นตอนที่ 3 Acetogenesis

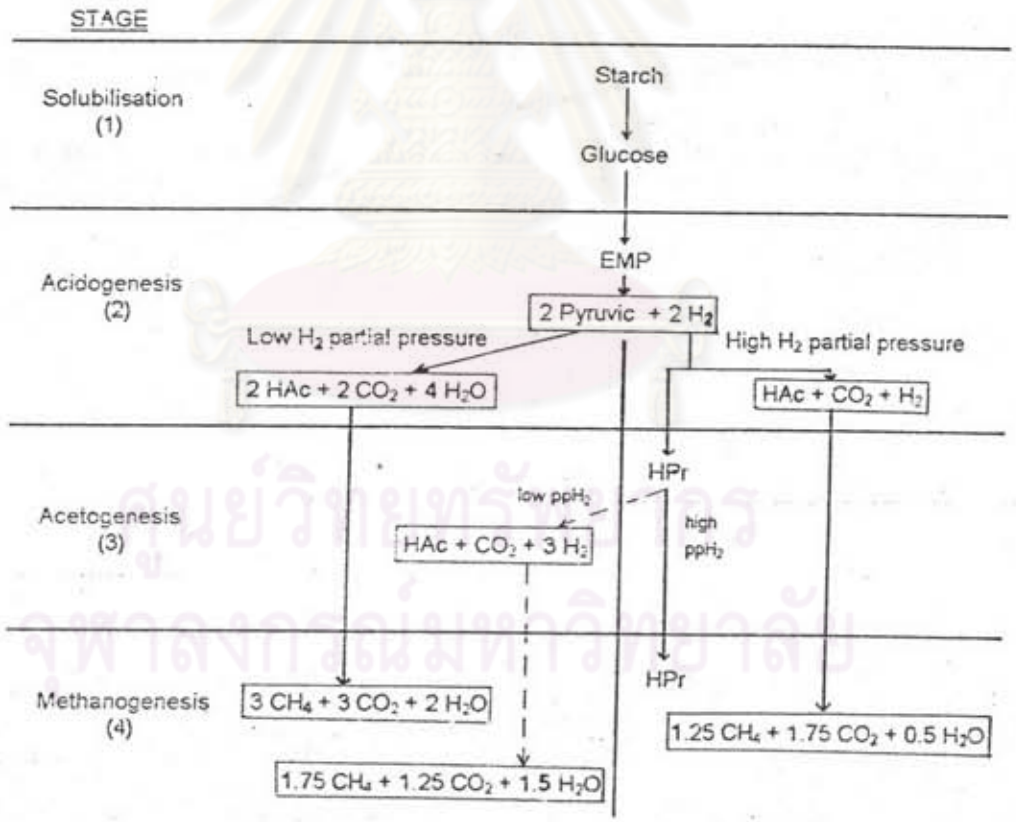
เนื่องจากการการผลิตมีเทนโดย Methanogenic organisms สามารถใช้สารอาหารอย่างเฉพาะเจาะจงมาก เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมธานอล และเมธิลามิน แต่ไม่สามารถใช้ กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิออนิก

กรดบิวทิริก เป็นสารอาหารโดยตรงในการผลิตมีเทน ดังนั้น แบคทีเรียจำพวก Acetogenesis จึงมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรด และขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (hydrogen producing acetogenic bacteria) สามารถเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอม มากกว่า 2 อะตอม เป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะ low ydrogen partial pressure ดังสมการ

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

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

ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแบคทีเรียพวกนี้จะมีส่วนช่วยไม่ให้มีการสะสมตัวของกรดบิวทิริก กรดโพรพิออนิก ในถังปฏิกิริยาซึ่งอาจทำให้ค่า pH ลดลงจนยับยั้งพวก Methangenesis ได้



รูปที่ 3.3 แสดงการย่อยสลายของแป้งภายใต้สภาวะ Low และ High hydrogen partial pressure [47]

ขั้นตอนที่ 4 Methanogenesis

แบคทีเรียชนิดที่ผลิตมีเทน จะเป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate anaerobic) ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 ประเภท คือ

1. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Obligate Acetoclastic Methanogen) แบคทีเรียพวกนี้จะใช้กรดอะซิติก เป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการ

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \qquad \Delta G' = -31 \text{ kJ/mol}$$

โดยจะเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการสร้างมีเทน ซึ่งจะผลิตมีเทนได้ประมาณ 70% ของมีเทนที่ได้ทั้งหมด

2. แบคทีเรียสร้างมีเทนจากไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (H_2 Utilizing Methane Bacteria) โดยแบคทีเรียพวกนี้จะใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการ

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad \Delta G' = -135.4 \text{ kJ/mol}$$

และแบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ

$$HCOOH \rightarrow CO_2 + H_2$$

ซึ่งแบคทีเรียพวก Methanogenesis นี้ สามารถที่จะเจริญเติบโตในช่วงที่มี pH แคบ คือ ประมาณ 6.8 - 7.2 และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโต รวมทั้งมักจะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำ (specific growth rate) ทำให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นช้า และมักเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ปัจจุบันได้มีการแบ่งชนิดแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนออกเป็นกลุ่มดังตารางที่ 3.1

3.1.1 ตัวอย่างวิถีชีวเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenesis)

จากกลูโคส ภายใต้วิถีชีวเคมีแบบ EMP (Embden - Meyerhof Pathway)

ในการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยภายใต้วิถีชีวเคมีแบบ EMP สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนแรก กลูโคสจะถูกออกซิไดส์กลายเป็นกรดไพรูวิก ดังสมการ

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

โดยแต่ละโมเลกุลของกลูโคส จะผลิตกรดไพรูวิก 2 โมล และ ATP 2 โมล โดยมีโคเอนไซม์ NAD^+ (อยู่ในรูปออกซิไดส์) เป็นพาหนะของอิเลคตรอน และไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH และเนื่องจากปริมาณ NAD^+ มีจำกัด จึงต้องมีวิธีปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ให้เป็น NAD^+ เพื่อให้เป็นพาหนะสำหรับขนส่งอิเลคตรอนต่อไป โดยปกติการปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ให้เป็น NAD^+ จะเกิดขึ้นดังสมการ

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน

(Adapted from Vogels et al.,1987 and Jones et al.,1987)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
ORDER I. METHANOBACTERIALES				
FAMILY I. Methanobacteriaceae				
Genus I. Methanobacterium				
M. alcaliphilum	Long rods to filaments	H2/CO2	37	7.0
M.bryantii	Long rods to filaments	H2/CO2	37-39	7.0
M.formicicum	Long rods to filaments	H2/CO2	37-45	
M.ivanovii	Rods to filaments	H2/CO2 , formate	45	
M.thernoaggregans	Long rods to filaments forming aggrgates	H2/CO2	65	7.0-7.5
M.thernoalcaliphilum	Long rods to filaments	H2/CO2	58-62	7.5-8.5
M.thermoautotrophicum	Long rods to filaments	H2/CO2	65-70	7.2-7.6
M.thermoformicicum	Rods	H2/CO2, formate	55	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
M.uliginosum	Long rods	H2/CO2	40	
M.wolfei	Rods	H2/CO2	55-65	7.0-7.5
Genus II. Methanobrevibacter	Short rods, shot chains			
M.arboriphilus	Short rods, shot chains	H2/CO2	37-39	7.5-8.0
Family II. Methanothermaceae				
Genus I. Methanothermus				
M.fervidus	Short rods	H2/CO2	83	6.5
ORDER II. METHANOCOCCALES				
FAMILY I. Methanococcaceae				
Genus I. Methanococcus				
M.aeolicux	Irregular cocci	Fomate		
M.deltae	Irregular cocci	H2/CO2, formate	37	
M.frisius	Regular cocci	H2/CO2, methanol, methylamines	36	
M.halophilus	Irregular forming aggregatei	Methanol, methylamines	26-36	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
M.junnaschii	Irregular cocci	H2/CO2	85	6.0
M.maripaludis	Regular to irregular cocci	H2/CO2, formate	35-39	6.8-7.2
M.thermolithotrophicus	Regular to irregular cocci	H2/CO2, formate	65	6.5-7.5
M.vannielii	Regular to irregular cocci	H2/CO2, formate	36-40	7.0-9.0
M.voltae	Regular to irregular cocci	H2/CO2, formate	35-40	6.7-7.4
ORDER III. METHANOMICROBIALES				
FAMILY I. Methanomicrobiaceae				
Genus I. Methanomicrobium				
M.mobile	Short rods	H2/CO2, formate	40	6.1-6.9
M.paynteri	Short irregular rods	H2/CO2	40	6.5-7.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
Genus II. Methanogenium				
M.aggreans	Irregular cocci forming aggregates	H2/CO2, fomate	35	
M.bourgense	Irregular cocci	H2/CO2, formate	37	
M.cariaci	Irregular cocci	H2/CO2, formate	20-25	6.8-7.3
M.fritonii	Irregular cocci	H2/CO2, formate	57	7.0-7.5
M.marisnigri	Irregular cocci	H2/CO2, formate	20-25	6.2-6.6
M. olentangyi	Irregular cocci	H2/CO2	37	
M.tatii	Regular to irregular cocci	H2/CO2, formate	37-40	7.0
M.thermophilicum	Irregular cocci	H2/CO2, formate	55-58	7.0
M.wolfei .	Irregular cocci	H2/CO2, formate	45	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
Genus III. Methanospirillum				
M.hungatei	Regular cuarved rods to long spiral filaments	H2/CO2, formate	30-40	6.6-7.4
FAMILY II. Methanosarcinaceae				
Genus I. Methanosarcina				
M.acetivorans	Irregular cocci, forming cysts	Methanol, methylamines, acetate	35-40	6.5-7.0
M.barkeri	Irregular cocci, forming packets	H2/CO2, Methanol, methylamines, acetate	35-40	7.0
M.mazei	Irregular cocci, forming packets	Methanol, methylamines, acetate, H2/CO2 very slowly or not	30-40	6.0-7.0
M.thermophila	Irregular cocci, forming aggregates	H2/CO2 , Methanol, methylamines, acetate	50	6.0-7.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
M.vavuolata	Irregular cocci, forming cysts	H2/CO2 Methanol, methylamines, acetate	40	
Genus II. Methanococcoides				
M.methylutens	Irregular cocci	Methanol, methylamines	30-35	7.0-7.5
ORDER III. METHANOMICROBIALES				
Family III. Methanoplanaceae				
Genus I. Methanoplanus				
M.endosymbiosus	Plate-shaped	H2/CO2 , formate	32	
M.limicola	Plate-shaped	H2/CO2 , formate	40	
Family not assiged				
Genus Methanothrix				
M.concilii	Rods to filaments	Acetate	35-40	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงการแบ่งประเภทของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (ต่อ)

Species	Morphology	Substrate	Opimal Temperature (^{0}C)	Optimal pH
M.soehngenii	Rods to filaments	Acetate	37	7.4 - 7.8
M.thermoactophila	Rods to filaments	Acetate	65	
Order and family not assigned				
Genus Methanolobus				
M.tindarius	Irregular cocci	Methanol, methylamines	25	
Genus Halomerthanococcus				
M.mahi	Irregular cocci	Methanol, methylamines	35	
GenusMethanosphaera				
M.stadtmanae	Spherical	Methanol	37	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$2NADH \longrightarrow 2NAD^{+} + 2H_2 \quad ...(2)$$

ซึ่งสมการที่ (2) จะเกิดขึ้นได้ตราบเท่าที่ H_2 สามารถหนีออกจากระบบได้ ดังนั้น สมการ (2) จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ hydrogen partial pressure มีค่าต่ำ (น้อยกว่า 10^{-6} บรรยากาศ, [47])

ขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนกรดไพรูวิกจากขั้นตอนแรก ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งจะได้กรดอินทรีย์ระเหยชนิดใดขึ้นนั้นอยู่กับค่า hydrogen partial pressure ดังนี้

กรณี Low hydrogen partial pressure

กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นอะซิทิลโคเอ (CH_3CoA) ดังสมการ

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

โดยมี NAD^{+} เป็นพาหนะของอิเลคตรอน โดยได้ NAD^{+} จากการปลดปล่อย H^{+} จากสมการCH_3CoA จะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นกรดอะซิติก พร้อมกับได้พลังงานออกมาในรูป ATP ดังสมการ

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

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

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

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

และระบบยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย H_2 - Utilizing bacteria สามารถใช้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในการผลิตมีเทน หรือ sulfate-reducing bacteria (SRB) ก็สามารถใช้ไฮโดรเจนได้ ดังสมการ

$$H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \qquad \Delta G' = -135 \text{ kJ/mol} \quad ....(6)$$

$$4H_2 + SO_4^{2-} + 2H^{+} \longrightarrow 4H_2O + H_2S \qquad \Delta G' = -152.2 \text{ kJ/mol} \quad ...(7)$$

จากสมการ (6) และ (7) จะมีผลทำให้ hydrogen partial pressure มีค่าต่ำเสมอ แต่ในสมการ (7) จะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียเกิดขึ้นด้วย

กรณี High hydrogen partial pressure

แต่อย่างไรก็ตาม หาก H_2 - Utilizing Methane bacteria ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือไม่มีแบคทีเรียชนิดดังกล่าวอยู่ในระบบ ทำให้ไฮโดรเจนเกิดการสะสมอยู่ในระบบ

จนทำให้ค่า hydrogen partial pressure มีค่าสูงทำให้ NADH ไม่สามารถปลดปล่อย H^+ ตามสมการ (2) เนื่องจาก H_2 ไม่สามารถหนีออกไปจากระบบได้ แบคทีเรียซนิดไม่สร้างมีเทนจึงต้องหาวิธีการฟื้นอำนาจของ NADH วิธีอื่น เพื่อให้ปฏิกิริยาการหมักสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยการใช้วิธีการสร้างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองได้ และใช้เป็นปฏิกิริยาควบคู่ในการเปลี่ยน NADH ให้เป็น NAD^+ และพบว่าการเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้เป็นกรดโพรพิออนิกสามารถทำให้ NADH ปลดปล่อย H^+ ได้ดังสมการ

$$CH_3COCOOH + 2NADH + ADP + P \longrightarrow CH_3CH_2COOH + 2NAD^+ + ATP + H_2O \quad ...(8)$$

จะเห็นว่ากรดไพรูวิก 1 โมล สามารถปลดปล่อย H^+ จาก NADH ได้ 2 โมล แต่ยังมีกรดไพรูวิกเหลืออยู่อีก 1 โมล ซึ่งจะถูกออกซิไดส์ไปเป็น CH_3CoA ตามปกติ ดังสมการ

$$CH_3COCOOH + NAD^+ \longrightarrow CH_3CoA + CO_2 + NADH \quad ...(9)$$

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

$$CH_3CoA + NADH \longrightarrow CH_3COOH + H_2 + NAD^+ \quad ....(10)$$

เมื่อรวมสมการ (1), (8), (9), และ (10) เข้าด้วยกันจะได้ปฏิกิริยาการหมักที่สมบูรณ์ ภายใต้สภาวะhighhydrogenpartialpressureมีดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 3ADP + 3P \longrightarrow CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + CO_2 + H_2 + 3ATP \quad ...(11)$$

นั่นคือการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกลูโคส 1 โมล ภายใต้สภาวะ high hydrogen partial pressure จะได้กรดโพรพิออนิก 1 โมล กรดอะซิติก 1 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ไฮโดรเจน 1 โมล และ ATP จำนวน 3 โมล เมื่อเปรียบเทียบสมการ (5) กับ (11) ในขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) จะเห็นว่าการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนภายใต้ low hydrogen partial pressure จะให้ ATP 4 โมล และผลิตกรดอะซิติก 2 โมล ในขณะที่ภายใต้สภาวะ high hydrogen partial pressure จะให้ ATP เพียง 3 โมล และ ผลิตกรดอะซิติก และกรดโพรพิออนิก อย่างละ 1 โมล

3.2 บทบาทของไฮโดรเจนที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จะมีการผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยไฮโดรเจนเกิดจากปฏิกิริยาการปลดปล่อย H^+ ของ NADH ดังสมการ (2)

$$2NADH \longrightarrow 2NAD^+_2$$

ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นการฟื้นอำนาจของ NAD^+ เพื่อใช้เป็นพาหนะของอิเลคตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์

$$NAD^+ + e^- + H^+ \rightarrow NADH \quad ....(12)$$

ภายใต้สภาวะ low hydrogen partial pressure สมการ (2) จะเกิดขึ้นได้โดย H_2จะสามารถหนีออกจากน้ำสู่บรรยากาศภายในถังย่อย ทำให้ปฏิกิริยาในสมการ (2) สามารถเกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาได้ตลอดเวลา

หากกระบวนการไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะต้องมีการทำงานที่สัมพันธ์กันของ H_2 Utilizing Methane bacteria โดยใช้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในการผลิตมีเทนตามสมการ

$$4H_2 + H_2CO_3 \rightarrow CH_4 + 3H_2O$$

การสะสมตัวของไฮโดรเจนจึงไม่เกิดขึ้น hydrogen partial pressure จึงมีค่าต่ำตลอดเวลา แต่ถ้าการทำลายไฮโดรเจนไม่เกิดขึ้น หรือไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการสะสมตัวของไฮโดรเจนจนถึงจุดอิ่มตัว ทำให้ hydrogen partial pressure มีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดผลต่อกระบวนการแบบไร้ออกซิเจน 2 ประการ คือ

1. ผลกระทบต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย

ภายใต้สภาวะที่มีไฮโดรเจนละลายน้ำมากขึ้นจนเกิด high hydrogen partial pressure ทำให้แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน หาทางปลดปล่อย H^+จาก NADH โดยการเปลี่ยนกรดไพรูวิกไปเป็นกรดโพรพิออนิก ดังสมการ

$$CH_3COCOOH + 2NADH + ADP + P \rightarrow CH_3CH_2COOH + 2NAD^+ + 2ATP + H_2O \quad ...(8)$$

ปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ hydrogen partial pressure มีระดับสูงกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ ปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยภายในสภาวะที่มี hydrogen partial pressureสูง และต่ำ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.4

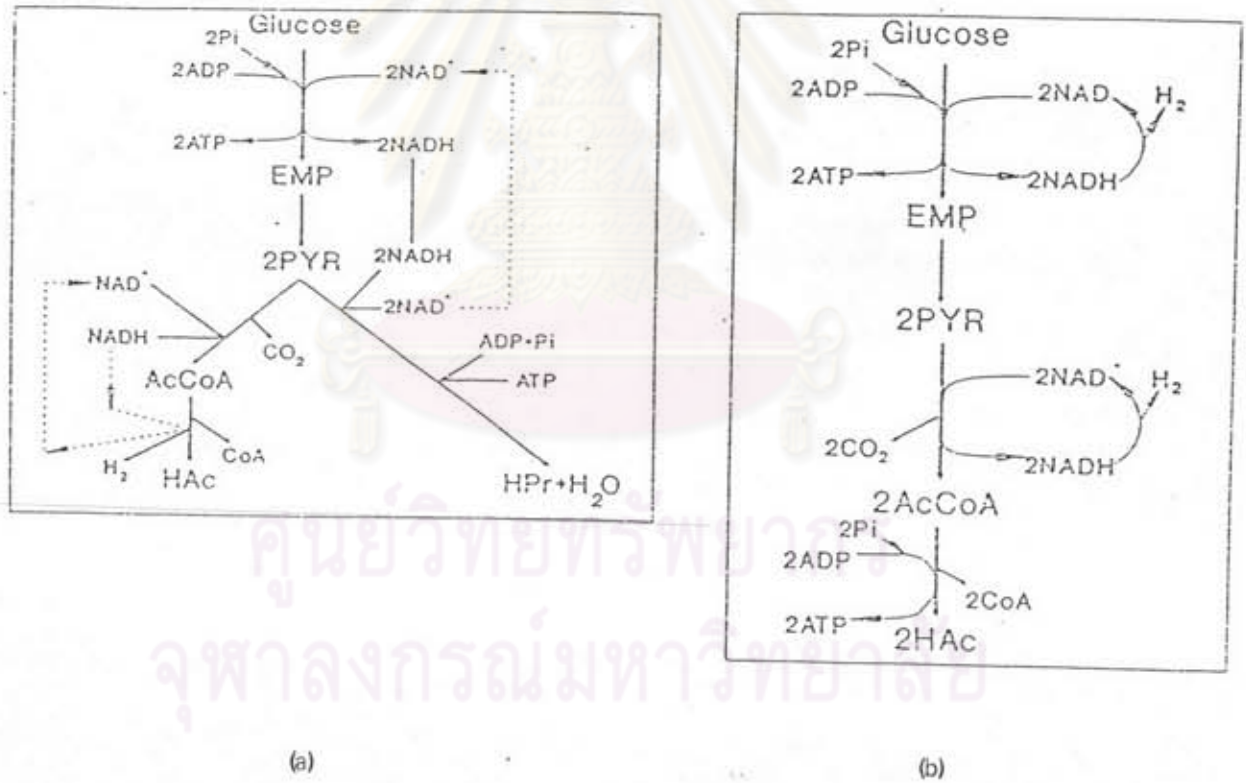
2. ผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติก

ในขั้นตอน Acetogenesis เป็นขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม ให้เป็นกรดอะซิติกโดย Acetogenic bacteria ก่อน จึงสามารถใช้สร้างมีเทนได้ การเปลี่ยนแปลงกรดโพรพิออนิกไปเป็นกรดอะซิติกแสดงได้ ดังสมการ

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad ...(13)$$

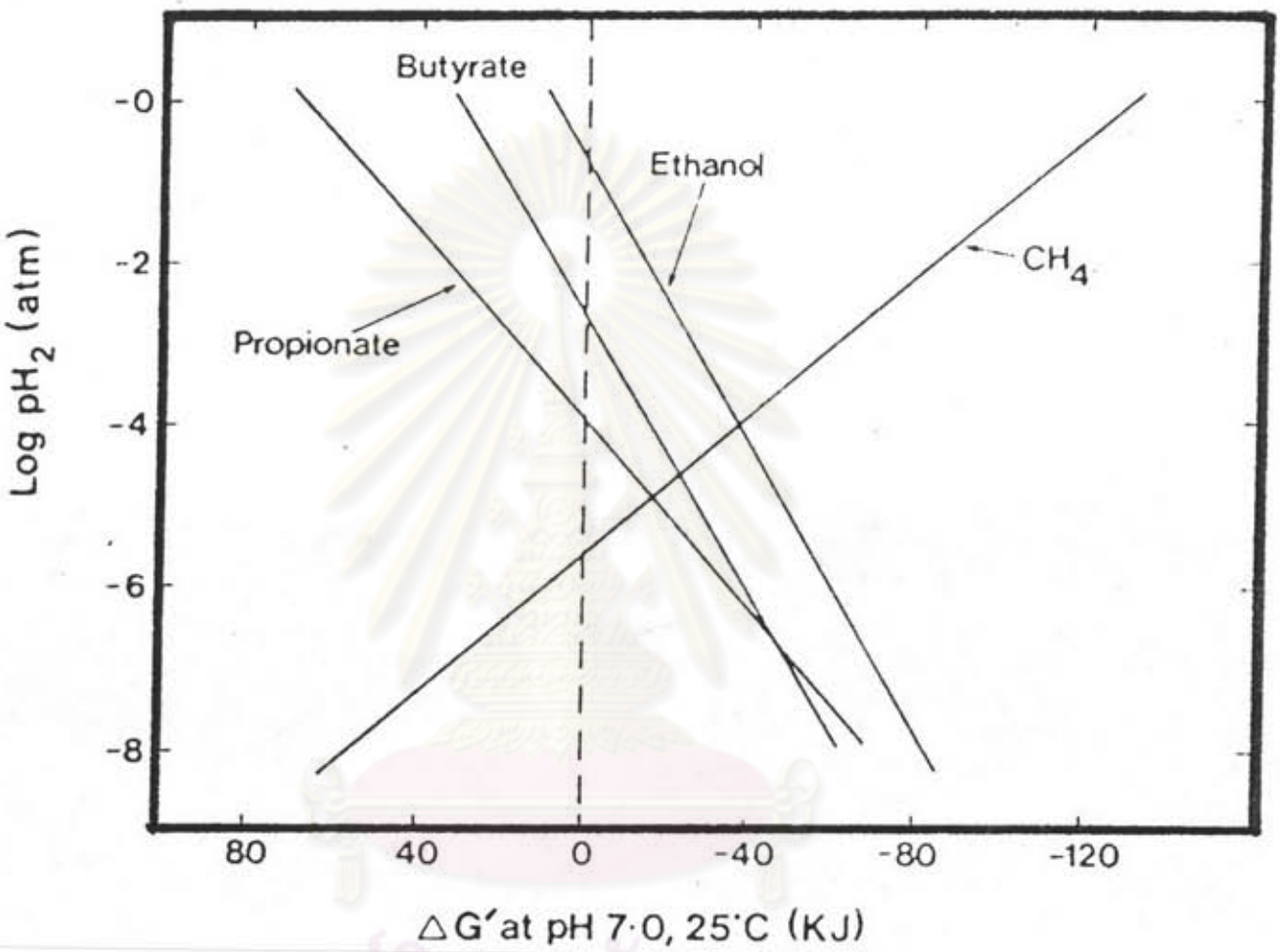
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะพบว่ามีไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย ดังนั้น หากไม่สามารถกำจัดไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นได้ ปฏิกิริยาในสมการ (13) จะเกิดการหยุด ไม่สามารถเปลี่ยนกรดโพรพิออนิกไปเป็นกรดอะซิติกได้ ซึ่งการที่ hydrogen partial pressure เปลี่ยนไป มีผลทำให้ค่าพลังงานอิสระมีค่าเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.5 หากhydrogen partial pressure มีค่าไม่เกิน 9 x 10^{-5} บรรยากาศ ปฏิกิริยา (13) จะดำเนินไปได้ แต่ หากมีค่าสูงกว่า 9 x 10^{-5} บรรยากาศ จะทำให้กรดโพรพิออนิกสะสมอยู่ในระบบ เนื่องจาก ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก การสะสมตัวของกรดโพรพิออนิก หรือกรดอินทรีย์ระเหยอื่นๆ จะส่งผลให้ค่า pH ของระบบมีค่าต่ำลง จนทำให้อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต ของแบคทีเรียในระบบ และยังพบว่ากรดโพรพิออนิกเป็นพิษต่อแบคทีเรียไร้ออกซิเจน เมื่อมีความ เข้มข้นมากกว่า 1,000 มก./ล. อีกด้วย



(a) (b)

รูปที่ 3.4 แสดงการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยภายใต้สภาวะ (a) High และ (b) Low hydrogen partial pressure [47]



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนค่าพลังงานอิสระ เมื่อ Hydrogen Partial Pressure มีค่าเปลี่ยนแปลง [38]

3.3 ระบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket)

กระบวนการไร้ออกซิเจน (anaerobic treatment) สำหรับน้ำเสียมักใช้ประโยชน์ใน 2 รูปแบบคือ

1. การสร้างเสถียรภาพให้ตะกอนอินทรีย์ โดยเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยการย่อยสลายตะกอนสารอินทรีย์ หรือสลัดจ์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ ที่ได้จากถังตกตะกอนขั้นต้น และหรือถังตกตะกอนขั้นสุดท้ายจากการบำบัดแบบชีวชนิดต่างๆ ซึ่งกระบวนการไร้ออกซิเจนที่มักใช้ก็คือถังหมักแบบธรรมดา (Conventional anaerobic digestion) หรือถังหมักแบบสองเฟส (Two-phase anaerobic digestion)

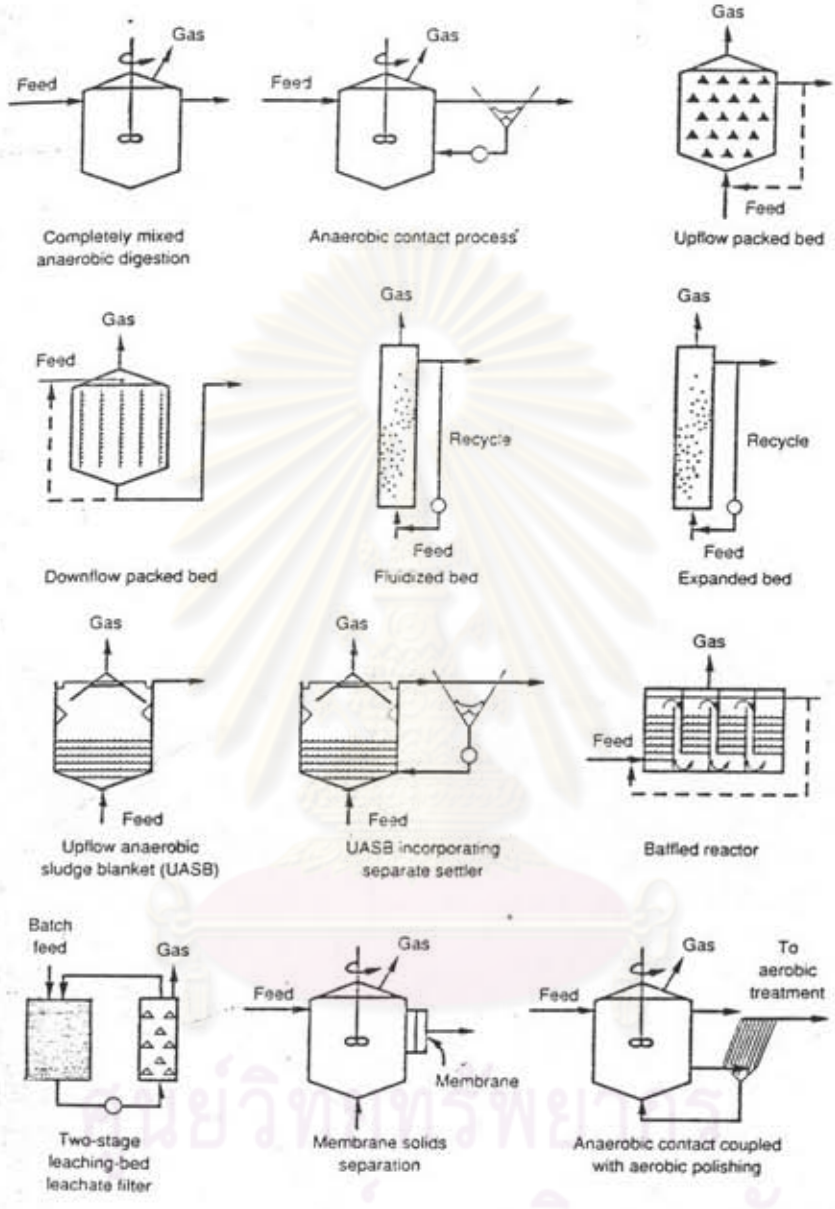
2. ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำเสียเป็นหลัก ซึ่งกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ ระบบ Anaerobic cotact, Anaerobic filter, Anaerobic fluidized bed (AFB), Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกันไป โดยลักษณะของแต่ละระบบแสดงดังรูปที่ 3.6

กระบวนการไร้ออกซิเจน มักมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนหลายประการเช่น

- สลัดจ์ที่ได้มักน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน
- ได้ก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซมีเทน สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้
- ต้องการอาหารเสริมเช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ต่ำ
- ความมีเสถียรภาพในการทำงานของระบบต่ำ เป็นต้น

3.3.1 ความเป็นมาของระบบ UASB

กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของระบบ UASB ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในเวลาไม่นานนัก Standers [51] พบว่าการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีอยู่ในถังหมักได้เป็นจำนวนมาก โดยติดตั้งถังตกตะกอนไว้ตอนบนของถังหมัก จะทำให้ใช้เวลาในการบำบัดน้ำเสียสั้นลง และยังสามารถจะรับปริมาณน้ำเสียเข้าระบบได้มากขึ้นด้วย การมี high loading rate จะทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งทำให้มีการผสมที่ดีในชั้น bed และ blanket Lettinga และคณะ [32] ได้พัฒนาระบบดังกล่าว โดยเลี้ยงให้มีจุลินทรีย์เกาะตัวเป็นกลุ่มหรือเป็นเม็ด พร้อมทั้งพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ (Gas-solid seperator, GSS device) จึงเริ่มมีการใช้ระบบ UASB เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ตารางที่ 3.2 แสดงการใช้ระบบยูเอสเอบีในการบำบัดน้ำเสีย ในประเทศเนธอร์แลนด์ จนถึงเดือนกันยายน 1990 (มีประมาณ 205 ถัง)



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของระบบต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน [40]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 3.2 แสดงจำนวนโรงบำบัดน้ำเสียที่ใช้ระบบ UASB ก่อนเดือนกันยายน 1990 [35]

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.

3.3.2 ข้อดีข้อเสียของระบบ UASB

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสภาวะความขาดแคลนพลังงานในปัจจุบันทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการแยกเชื้อแบคทีเรีย เช่น พวก Methanogenesis ออกมาเป็นเชื้อบริสุทธิ์สำเร็จ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแบคทีเรียพวก anaerobic มากขึ้น การใช้ระบบ UASB ในการบำบัดน้ำเสีย มีข้อดีข้อเสียดังตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตาราง 3.3 แสดงข้อดีข้อเสียของระบบ UASB

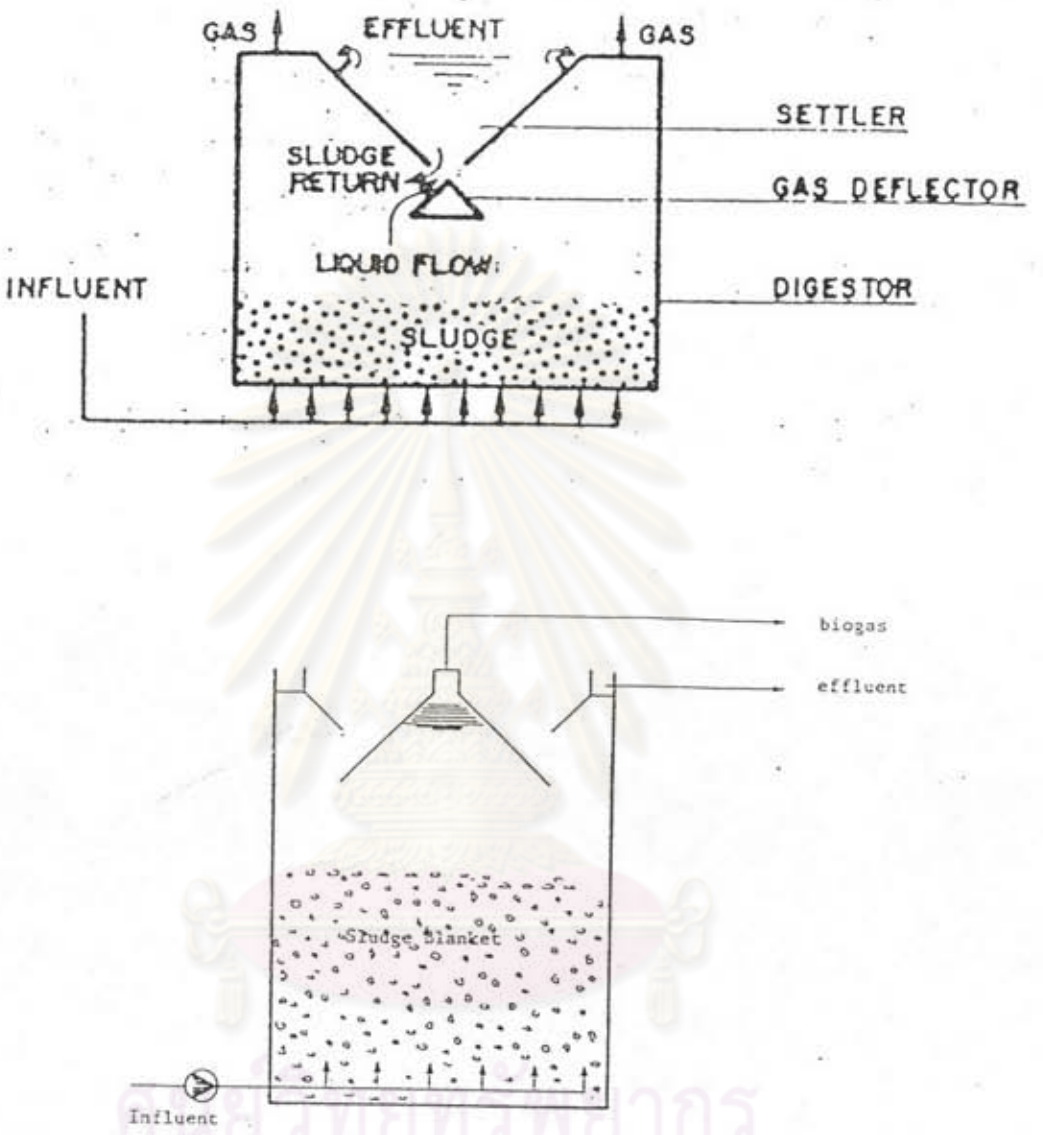
ข้อดี	ข้อเสีย
1. มีความต้องการพลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมอากาศ	1. ต้องมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการกวน
2. ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง	2. ต้องเลี้ยงจุลินทรีย์ให้จับตัวเป็นเม็ด มิฉะนั้นจะด้อยประสิทธิภาพ
3. เกิดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อย	3. ต้องพยายามรักษาตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม และควบคุมการล้างออก
4. สามารถรับออร์กานิกโหลดดิงได้สูงขึ้น	4. ต้องใช้เวลาในการ start-up ระบบ ค่อนข้างนาน
5. ผลผลิตที่ได้คือ ก๊าซชีวภาพ (ก๊าซมีเทน) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้	5. แบคทีเรียโดยเฉพาะพวกผลิตมีเทน มีความสามารถเจริญเติบโตได้ดี ในช่วงสภาวะเหมาะสมที่แคบ เช่น pH ประมาณ 6.8-7.2

3.3.3 ลักษณะและการทำงานของระบบ UASB

ระบบการทำงานแบบ UASB เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการฉีดพ่นน้ำเสียจากด้านล่างสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา โดยไม่ต้องมีสารตัวกลางหรือวัสดุอื่นใดมาช่วยในการพยุงมวลจุลินทรีย์ และลักษณะทั่วไปของถังปฏิกิริยาแบบ UASB จะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม หรือทรงกระบอกก็ได้ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 3.7 คือ

1. ส่วนที่เป็นถังหมักพร้อมด้วยระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของถัง

2. ส่วนที่แยกน้ำ, ก๊าซ และตะกอนแขวนลอย ซึ่งอยู่ส่วนบนของถังหมัก โดยมีอุปกรณ์แยกก๊าซ, น้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ออกจากกัน ประกอบด้วยแผ่นเอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา [26] นอกจากนี้ ยังช่วยในการป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ฟุ้งกระจายโดยก๊าซชีวภาพหลุดออกไปจากถังหมัก ในการทำงานของระบบ UASB จะมีการเติมเชื้อแบคทีเรียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา จากนั้นทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่น และรวมเป็นเม็ด



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะทั่วไปของถังปฏิกิริยาแบบ UASB

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หรือเกล็ด ทำให้มีความเร็วในการจมตัวลงสู่ก้นถังปฏิกิริยาสูง (high settling velocity) รวมเป็นชั้นของ sludge bed ส่วนกลุ่มที่ความหนาแน่นต่ำ และมีความเร็วในการจมตัวต่ำกว่าจะลอยอยู่เป็นชั้นของตะกอนแขวนลอย (sludge blanket)

เมื่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยา จุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้เกิดเซลล์ และก๊าซขึ้น โดยก๊าซที่เกิดขึ้น (ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน) และความเร็วของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ลอยสู่ด้านบน ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับ ตะกอนแขวนลอย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อน้ำเสียเคลื่อนที่จนถึงส่วนบนของถังซึ่งมี อุปกรณ์แยกก๊าซ, น้ำเสีย และตะกอนแขวนลอย ทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นถูกแยกไปเก็บยังส่วนบน และไหลไปตามท่อสู่ที่เก็บก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์จะตกลงสู่ก้นถังปฏิกิริยา ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะไหลออกทางด้านบนของถัง ตาราง 3.4 แสดงวัตถุประสงค์ในการติดตั้งอุปกรณ์แยกก๊าซ, น้ำเสีย และ ตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-solid seperator device, GSS device)

จะเห็นได้ว่า ปัจจัยสำคัญของระบบ UASB คือ การเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะเป็นเกล็ด หรือเม็ด ซึ่งมีความหนาแน่น และน้ำหนักมาก เพื่อที่จะตกตะกอนได้ดี เป็นสิ่งสำคัญของระบบนี้ เพราะถ้าไม่มีการรวมตัวเป็นเม็ด หรือเกล็ด จะทำให้เกิดการหลุดออก (wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ได้ เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง หรืออาจล้มเหลวได้ นอกจากนี้การป้องกันน้ำเสียที่เข้าระบบไม่ให้เกิดเป็นช่อง (channelling) ก็เป็นสิ่งสำคัญ เพราะมิฉะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบลดลงได้

ตาราง 3.4 วัตถุประสงค์ในการติดตั้ง GSS device สำหรับระบบ UASB [35]

1. เพื่อแยก และนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นออกจากถังปฏิกิริยา
2. เพื่อป้องกันการหลุดออก (wash out) ของจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น
3. เพื่อให้สลัดจ์ตกตะกอนกลับไปด้านล่างของถังปฏิกิริยา
4. เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนลอย (sludge blanket) ขยายตัวและฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็วเข้าไปในส่วนตกตะกอน
5. เพื่อเป็นการทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพที่ดี

3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ UASB

3.4.1. อุณหภูมิ (Temperature)

ระบบ UASB สามารถแบ่งช่วงการทำงานในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 3 ช่วง คือ

- ช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) ช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 °ซ.
- ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิค (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 °ซ.
- ช่วงการทำงานไซโคฟิลิค (Phychrophilic) จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ.

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) แต่นิยมให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากพบว่าพวกเทอร์โมฟิลิคจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า ส่วนช่วงไซโคฟิลิค (Phychrophilic) ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยมากและในส่วนของการย่อยสลาย (Hydrolysis) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 20 °ซ ดังนั้น การรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้มีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด

3.4.2. พีเอช, สภาพความเป็นด่าง, กรดอินทรีย์ระเหย (pH, Alkalinity, Volatile Fatty Acid)

ค่าของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และ กรดอินทรีย์ระเหย มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการพีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 6.5-7.5 ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแบคทีเรียชนิดที่สร้างกรดมักสามารถปรับตัวในช่วงที่มีพีเอชกว้างกว่า คือประมาณ 5-8.5 ดังนั้น ค่าพีเอชจึงมีความสำคัญต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนมากกว่า กรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตโดยพวกแบคทีเรียที่สร้างกรด (acidogenesis) ปกติควรมีค่าอยู่ในระบบประมาณ 200 - 400 มก./ล. ในรูปของกรดอะซิติก โดยถ้าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณ แสดงว่าระบบเสียสภาพสมดุลย์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดโพรพิออนิกมากกว่า 1000 มก/ล. จะแสดงความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ สภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต จะเป็นตัวแสดงให้ทราบ ถึงกำลังของบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ของระบบ ถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำไม่พอเพียง ปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสภาพดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้น ถ้ามีกำลังของบัฟเฟอร์มากพอ โดยทั่วไปในการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรมีค่าสภาพความเป็นด่าง ประมาณ 2,000- 5,000 มก./ล. และอัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล.ของกรดอะซิติก) ต่อสภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (มก./ล. ของแคลเซียมคาร์บอเนต)

ซึ่งเป็นการแสดงค่ากำลังของบัฟเฟอร์ทางหนึ่ง โดยถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ามีกำลังของบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 0.8 แสดงว่ามีกำลังของบัฟเฟอร์ต่ำ อาจทำให้ระบบ มีประสิทธิภาพลดลงได้

สารเคมีที่ใช้ในการควบคุมพีเอช ได้แก่ การเติมด่างแก่ไบคาร์บอเนต หรือคาร์บอเนตให้แก่ระบบ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เติมให้ระบบ เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี เป็นการเติมไบคาร์บอเนตให้แก่ระบบโดยตรง แต่ราคามักจะสูงกว่าสารอื่น

3.4.3. สารอาหารเสริม (Nutrient)

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนมีข้อดีอย่างหนึ่ง คือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมาน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำกว่า McCarty [37] กล่าวว่า จุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน BOD:N:P = 100:1.1:0.2 ในปัจจุบันพบว่า แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนต้องการธาตุบางอย่างในปริมาณน้อย แต่ขาดไม่ได้ มิฉะนั้นระบบไม่อาจดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพได้ ธาตุดังกล่าวได้แก่ เหล็ก, โคบอลท์, นิเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดี การเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียลำบาก เนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่างๆตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ เช่น เหล็กรวมกับซัลไฟด์เป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยเติม Yeast Extract หรือ Milorganite ให้แก่ระบบโดยตรง

3.4.4. สารพิษ (Toxic)

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ เพราะจะไปรบกวนการทำงานของแบคทีเรียในระบบ หรือยับยั้งการเจริญเติบโต โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ ความรุนแรงของพิษย่อมขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของนั้นๆด้วย สารที่เป็นพิษต่อระบบ ได้แก่

<u>พิษของอิออนบวก และโลหะหนัก</u>

อิออนบวกที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โปตัสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งธาตุเหล่านี้โดยปกติในระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะ จะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินความจำเป็น จะเกิดเป็นพิษ ต่อ

แบคทีเรียได้ ปกติอิออนบวกที่มีวาเลนซีสูง จะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวก ที่มีวาเลนซีต่ำ ดังตารางที่ 3.5

ตาราง 3.5 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งอิออนบวก [37]

ชนิดอิออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	กระตุ้น	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

พิษของอิออน สามารถลดความเป็นพิษลงได้ (antagonism) เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ Na^+ มีความเข้มข้น 3,500 มก./ล. สามารถทำให้ลดลงได้ ถ้ามี Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมอยู่ระหว่าง 50-1,000 มก./ล. แต่ในทางตรงกันข้าม อิออนบางชนิด จะไปเพิ่มความเป็นพิษให้มากขึ้น เมื่ออยู่ร่วมกัน (synergism)

การยับยั้งจากโลหะหนัก (heavy metal) มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน Mosey and Hughes [44] ศึกษาพบว่า Cu^{2+} มีผลต่อระบบมากที่สุด ดังแสดงในตาราง 3.6

ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะว่าซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเป็นเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ดี โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับแบคทีเรีย แม้จะในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิษของกรดโวลาไทล์

กรดโวลาไทล์ถ้าถูกสร้างขึ้นมามากเกินไป เช่น ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ หรืออาหารเข้ามามากแบคทีเรียที่ผลิตกรดจะผลิตกรดโวลาไทล์ออกมามาก หากว่าระบบมีกำลังของบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดผลิตมีเทนได้

ตาราง 3.6 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ในการยับยั้งประสิทธิภาพ 50 % [44]

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

พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในน้ำเสียของระบบไร้ออกซิเจนมาจากการย่อยสลายพวกโปรตีน โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) และแอมโมเนีย (NH_3) ดังสมการ

$$NH_4^+ \leftrightarrow NH_3 + H^+$$

โดยปริมาณของแอมโมเนียมอิออนนี้ ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือ ที่พีเอชประมาณ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1% ของแอมโมเนียทั้งหมดโดยจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมอิออน 99% แต่ถ้าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะไปทางขวามือมากขึ้น ทำให้เกิดแอมโมเนียมาก ซึ่งแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่าแอมโมเนียมอิออน โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียคือมากกว่า 150 มก./ล. ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนความเข้มข้นของแอมโมเนียมอิออนได้สูงถึง 3,000 มก./ล. ดังนั้น การรักษาพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 หรือต่ำกว่า จะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออนซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า รูปที่ 3.8 แสดงความเข้มข้นของแอมโมเนียและพีเอชต่อระบบ และ ตารางที่ 3.7 แสดงผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งรวมทั้งแอมโมเนียและแอมโมเนียมอิออนต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ตาราง 3.7 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน [28]

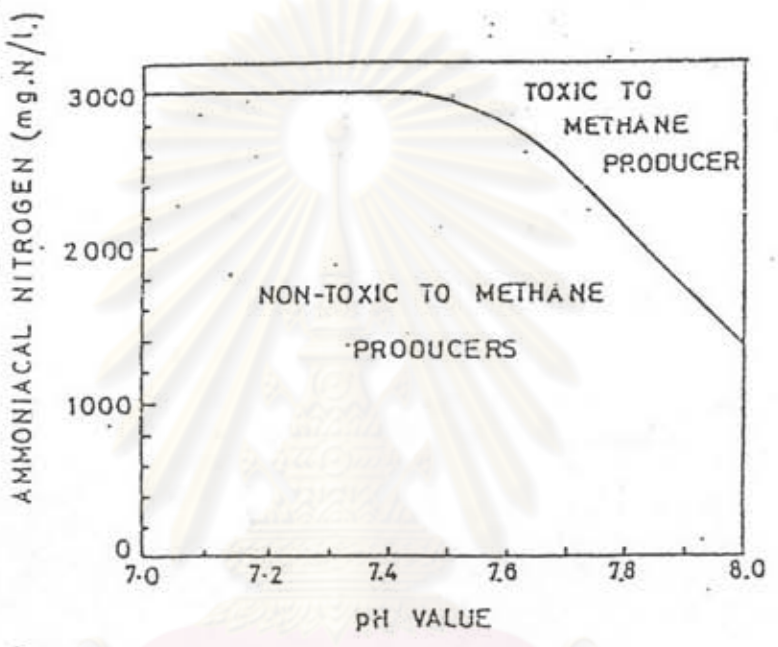
แอมโมเนียไนโตรเจน (มก/ล.)	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลชัด
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูง
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

3.4.5. ผลของซัลเฟตต่อระบบ UASB

การที่น้ำเสียมีปริมาณของซัลเฟตมาก จะทำให้มีแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้โดยกลุ่มของ Sulfate-Reducing Bacteria (SRB) เช่น Desulfovibrio, Desulfotomaculum จะสามารถใช้ซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นตัวรับอิออนตัวสุดท้ายได้ โดยซัลเฟตจะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ได้ดังสมการ

$$SO_4^{2-} + 4H_2 + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O \qquad \Delta G' = -152.2 \text{ KJ/mol}$$

โดยแบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) จะแย่งอาหารกันกับพวกผลิตมีเทน (Methanogenic bacteria)โดยสามารถใช้อะซิเตท และไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร และจากค่า $\Delta G'$ แสดงให้เห็นว่าสามารถชนะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนได้ ทำให้ผลผลิตที่เป็นก๊าซมีเทนลดน้อยลง นอกจากนี้ การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ถ้ามีปริมาณมากเกินไป Cappenbeg [12] พบว่าแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanobacterium spp.) จะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ ถ้ามี H_2S เท่ากับ 0.1 nM อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาในแง่การใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหารของ แบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) จะทำงานสัมพันธ์กันกับแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน โดยจะช่วยในการ ทำให้ hydrogen partial pressure มีค่าต่ำเสมอ ทำให้เป็นการลดการสะสมตัวของก๊าซไฮโดรเจนทางหนึ่ง ดังนั้น แบคทีเรียที่รีดิวซ์ซัลเฟตจึงมีบทบาทต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย และมีผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติก จากกรดโพรพิออนิกด้วย



รูปที่ 38 แสดงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบ [41]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.6. การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ

การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบมีความสำคัญมาก เพราะหากมีการหลุดออกไปของแบคทีเรียมากไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงด้วย ซึ่งการรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบโดยใช้อุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-solid seperator) เพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในระบบได้นาน ดังนั้น การออกแบบ อุปกรณ์แยกสามสถานะให้เหมาะสม จึงเป็นสิ่งจำเป็น

3.4.7. ออร์กานิกโหลดดิง (ORGANIC LOADING RATE)

ออร์กานิกโหลดดิงนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสารอินทรีย์ การตกตะกอนของจุลินทรีย์ และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ น้ำเสียควรมีออร์กานิกโหลดดิงต่ำกว่าอัตราสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ เพราะถ้ามีมากกว่าเช่น กรณี shock load จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

3.4.8. การกระจายน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา

เนื่องจากระบบยูเอเอสบี เป็นระบบที่ไม่ต้องการออกซิเจนจึงไม่ต้องมีการเติมอากาศ และมักไม่ต้องการการกวน (mixing) ดังนั้น การจัดระบบการจ่ายน้ำเสียเข้า (Feed inlet system) ให้เหมาะสม เพื่อให้มีการสัมผัสกันระหว่างตะกอนจุลินทรีย์ และน้ำเสียอย่างทั่วถึง และป้องกันการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย (short circuit) จึงมีความสำคัญ นอกจากนี้ระบบจ่ายน้ำเสียเข้าควรออกแบบให้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย เนื่องจากเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง อาจเกิดการอุดตันได้

3.4.9. ศักยภาพการให้และรับอิเลคตรอน (Oxiadation-Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเลคตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) หรือปฏิกิริยารีด็อกซ์ (Redox reaction) ซึ่งเป็นผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเลคตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเลคตรอน) ความแตกต่างทางด้านศักยภาพ หรือความสามารถในการให้ และรับอิเลคตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสอง อาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โพเทนเชียล หรือเรียกสั้นๆ ว่า โออาร์พี (ORP)

ปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำ ส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยารีด็อกซ์ คือ มีสารที่ให้อิเลครอน (Oxidizing agent) และสารที่รับอิเลคตรอน (Reducing agent) ควบคู่กันเสมอ สารอินทรีย์ที่

มีอยู่ในน้ำเสีย มักเป็นตัวที่ให้อิเลคตรอน และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน จะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอน ซึ่งจะออกซิไดส์สารอินทรีย์ให้มีพลังงานลดลงส่วนระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน สารที่รับอิเลคตรอนจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือกรดอะซิติกแทน

<u>ส่วนประกอบของเครื่องวัดโออาร์พี</u>

1. Inert metal electrode หรือ Unattachable electrode จะทำจากโลหะมีตระกูลเช่น ทองคำขาว (Platinum) ทอง (Gold) หรือนิเกิล (Nickle) ซึ่งมีหน้าที่ในการนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่มีส่วนในการวัดศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

2. Reference electrode อาจเป็น Hydrogen reference electrode ซึ่งค่าที่วัดได้ จะเป็นค่าความต่างศักย์มาตรฐาน (E_h) แต่ถ้า Reference electrode เป็น Silver-Silver Chloride ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ต้องนำมาแก้ไขให้เป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานตามสมการ (14)

$$E_h = E + \text{Voltage of reference electrode} \quad ..(14)$$

เมื่อ E_h = ศักย์ไฟฟ้าจาก Hydrogen reference electrode

E = ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จริงจากการใช้ Reference electrode 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

เนื่องจากค่าโออาร์พี จะบอกถึงอัตราส่วนสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณสารที่เป็นตัวออกซิไดส์ต่อสารที่เป็นตัวรีดิวซ์รวมในระบบ หรือบอกเฉพาะความเข้มสัมพัทธ์ ไม่อาจบอกความจุ หรือปริมาณที่แท้จริงเพราะปฏิกิริยารีดอกซ์มีการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้น จึงเป็นข้อจำกัดต่อความแม่นยำในการวัด ความสัมพันธ์ทางด้านปริมาณของปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจแสดงได้ในรูปสมการของเนินซท์ (Nernst equation) ดังสมการ (15)

$$E_h = E_0 + RT/nF.\log(Oxidant/Reductant) \quad (15)$$

เมื่อ E_h = ศักย์ไฟฟ้าในระบบ เมื่อเทียบจากไฮโดรเจนอิเลคโทรด, โวลท์

E_0 = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในระบบ เมื่อปฏิกิริยาของสารออกซิแดนท์เท่ากับสารรีดักแทนท์ที่ 25 °ซ., โวลท์

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (เท่ากับ 8.315), โวลท์/คูลอมบ์

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, องศาเคลวิน

F = 98,500 คูลอมบ์

n = จำนวนอิเลคตรอนที่ถ่ายเทในปฏิกิริยารีด็อกซ์

หรืออาจเขียนเป็นสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$E_h = E_0 + 0.0591/n.\log(Oxidant/Reductant) \quad (16)$$

ในระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน อัตราส่วนของสารออกซิแดนท์ต่อรีดักแทนท์จะมีค่าสูง นั่นคือ ศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะมีค่าบวกมากกว่า แต่ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน อัตราส่วนนี้จะมีค่าต่ำ ศักย์ไฟฟ้าจึงมีแนวโน้มที่จะมีค่าติดลบ

<u>ข้อจำกัดของการวัดโออาร์พี</u>

1. ผิวของอิเลคโทรด ง่ายต่อการถูกเคลือบจากสารที่เกิดการถ่ายเทอิเลคตรอน หรือเกิดการ โพลาไรเซชัน (Polarization)

2. สารที่เป็นออกซิแดนท์ หรือรีดักแทนท์ที่เข้มข้น อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาติดค้าง (Memory effect) อยู่ที่ผิวของอิเลคโทรดได้

3. พีเอชของสารละลายมีผลต่อการวัด เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชัน Cr^{2+}

4. อุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อการวัดเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 mV ต่อ 1 °C ที่เปลี่ยนแปลง)

แม้ว่า ค่าโออาร์พีไม่อาจอธิบายสภาพที่แท้จริงของระบบที่ดำเนินไปได้อย่างชัดเจน แต่ก็สามารถนำมาประเมินลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการอย่างคร่าวๆ ได้

การนำเอาโออาร์พี มาใช้ควบคุมกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน พบว่า มีตัวแปรที่มีผลต่อค่าที่วัดได้หลายประการ คือ

1. ชนิดของจุลินทรีย์
2. สภาวะของจุลินทรีย์
3. วัฏภาคของการเจริญเติบโต (Growth phase) ของมวลจุลินทรีย์
4. ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม รวมทั้งชนิด และปริมาณของสารภายในระบบ
5. ระยะเวลาในการวัด

จากงานวิจัยต่างๆ ปรากฏว่า ได้ค่าโออาร์พีในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนแตกต่างกันไป ดังแสดงในตาราง 3.8

ตาราง 3.8 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับค่าโออาร์พีที่วัดได้ในสภาพไร้ออกซิเจน

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16701823.

3.5 กลไกการเกิดเม็ด หรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol L.W. และคณะ [22] ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยสังเกตจากพฤติกรรมในการคงอยู่ หรือการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ (รูปที่ 3.9)

จากการทดลองของ Hulshoff Pol L.W. และคณะ [22] ได้กล่าวถึงขั้นตอนของการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

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

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีแล้ว ขั้นตะกอนล่างจะเกิดการขยายตัว เนื่องมาจากน้ำเสียที่ป้อนเข้าไป และก๊าซที่เริ่มเกิดในระบบ รวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (filamentous organisms) ซึ่งทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวได้น้อยลง

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

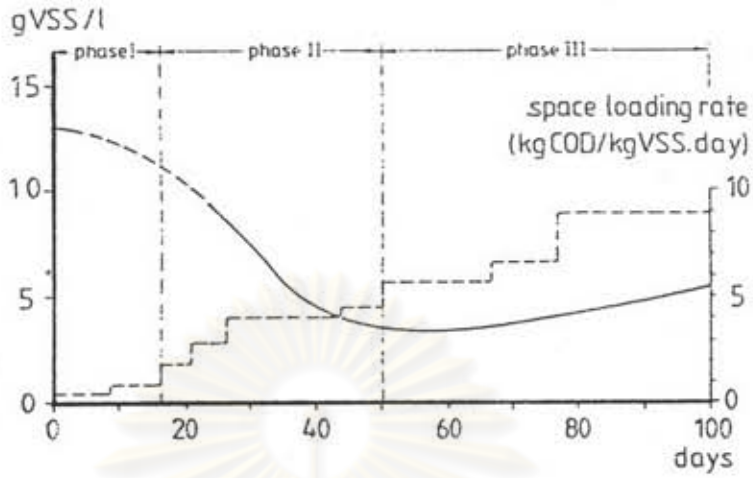
ในขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงมาก เนื่องจากการเพิ่มออร์กานิกโหลดดิงทำให้เกิดการผลิตก๊าซมากขึ้น ทำให้มีการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กๆ ออกนอกถัง ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ และหนักจะสามารถคงอยู่ในถังต่อไปได้ ซึ่งเป็นการคัดเลือกของระบบที่มีการสร้างจุลินทรีย์ และมีการรวมตัวกันของตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนจมอยู่ในส่วนล่างของถัง ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น (อาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มม.)

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

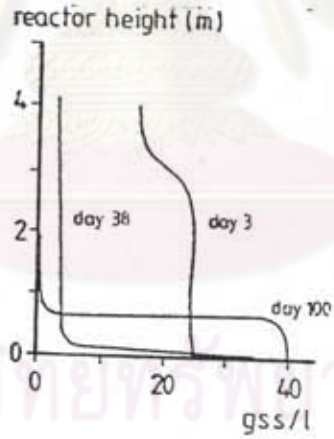
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีมากกว่าการหลุดออกนอกถังของตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเมื่อหลังจากระบบได้ผ่านขั้นตอนนี้แล้ว ระบบจะสามารถรับออร์กานิกโหลดดิงได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถจะรับได้ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมา ระบบอาจรับได้สูงถึง 50 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ลักษณะของการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในทั้ง 3 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งใช้เส้นกราฟความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (g.SS/l) ตามความสูงของถังแสดงถึงขั้นตอนทั้งสามดังกล่าว

Sam-Soon และคณะ [47] ทำการทดลองระบบยูเอเอสบี เพื่อศึกษาถึงที่มา และสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำแอปเปิ้ลเป็นน้ำเสีย และให้ข้อสังเกต ดังนี้:



รูปที่ 3.9 แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และออร์กานิคโหลดดิง ระหว่างขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในถังยูเอเอสบี [22]



รูปที่ 3.10 แสดงปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ตามความสูงของถังยูเอเอสบี [22]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของ H_2 Utilizing methane bacteria ชนิดหนึ่งคือ Methanobacterium Strain AZ (M. Strain AZ) กล่าวคือ ในสภาพแวดล้อมที่มี hydrogen partial pressure สูง อัตราส่วน ATP/ADP สูง M. Strain AZ สามารถใช้ H_2 เป็นแหล่งพลังงาน และสร้างกรดอะมิโนที่จำเป็นได้ แต่ไม่สามารถสร้าง cysteine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งและมีความสำคัญในการสร้างโปรโตพลาสซึม ทำให้ต้องอาศัย cysteine จากภายนอกเซลล์ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว และมีปริมาณ NH_3-N เพียงพอ รวมทั้งปริมาณ cysteine จากภายนอกมีจำกัด จะทำให้ M. Strain AZ สร้างกรดอะมิโนขึ้นในปริมาณมาก และเมื่อมีปริมาณมากเกินไปก็จะถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ กรดอะมิโนที่ถูกปล่อยออกมาจะรวมตัวกันเป็น polypeptide ล้อมรอบจุลินทรีย์และรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้น

Sam-Soon และคณะ [47,48] ได้สรุปลักษณะสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ไว้ดังนี้

1. ระบบต้องมี hydrogen partial pressure สูง
2. ปริมาณ NH_3-N ในระบบ ต้องมีในปริมาณที่เพียงพอ
3. ปริมาณ cysteine ในระบบ ต้องมีจำกัด
4. ค่าพีเอชในระบบควรเป็นกลาง
5. ลักษณะการไหลของน้ำเสียต้องเป็นลักษณะ plug flow

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย