หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีและรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 จุลชีวะและชีวเคมีของกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพในกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน มีลักษณะที่แตกต่างจากกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน คือ ไม่มีออกซิเจนอิสระซึ่งเป็นสารรับอิเล็คตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ปฏิกิริยาชีวเคมีของการหมักเป็นปฏิกิริยาที่สารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนโดยจุลชีพให้เป็นก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ อีกเล็กน้อย โดยมีลักษณะเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อน แม้ว่าความรู้พื้นฐานทางชีวเคมี และความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างจุลชีพต่าง ๆ ในกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้ถูกค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งทำให้เราเข้าใจกลไกของระบบเพิ่มมากขึ้น แต่ยังคงมีข้อที่น่าสังเกตอีกหลายประการที่นักจุลชีวะไม่สามารถอธิบายได้ ทำให้ต้องมีการศึกษาค้นคว้าจวบจนปัจจุบัน

ข้ออธิบายทางจุลชีวะและชีวเคมีที่จะกล่าวในที่นี้ จะนำเอารูปแบบที่ใหม่สุด ซึ่งได้พัฒนาขึ้นในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา และมีบางส่วนที่กำลังค้นคว้าอยู่ในปัจจุบัน มาอธิบายกลไกต่าง ๆ เพื่อความเข้าใจรายละเอียดของกระบวนการเพิ่มมากขึ้น

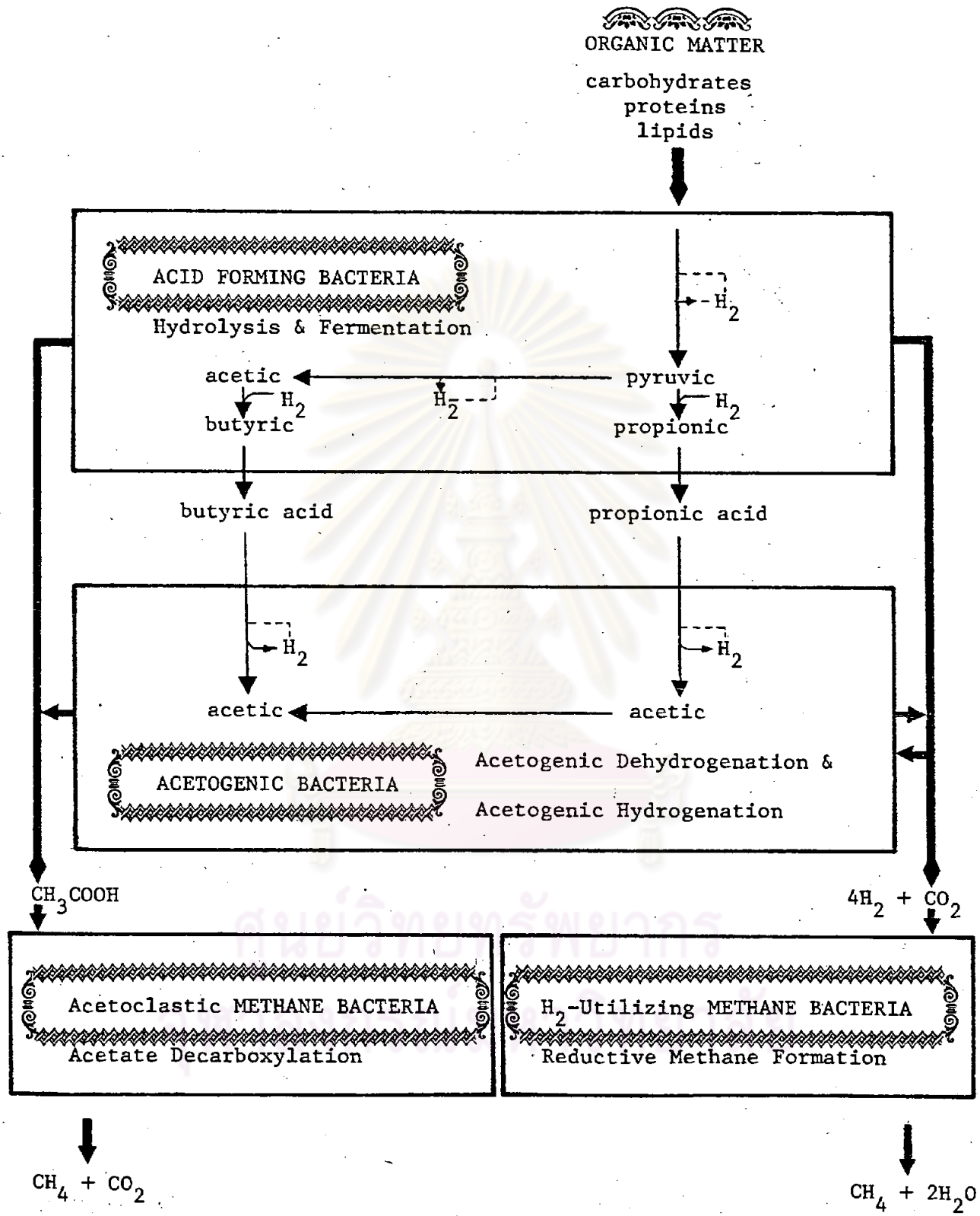
การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน แบ่งออกเป็นขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้ 2 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด (Acid Formation หรือ Non-Methanogenic Phase)

2. ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane Formation หรือ Methanogenic Phase)

ทั้งสองขั้นตอนเราจะแบ่งแบคทีเรียที่สำคัญออกได้เป็น 4 ประเภท (ดังภาพที่ 3.1) คือ

1. Acid Forming Bacteria
2. Acetoclastic Methane Bacteria
3. Acetogenic Bacteria
4. H_2-Utilizing Methane Bacteria



ภาพที่ 3.1 ขบวนการเมตาบอลิซึมของขบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (78)

3.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด

ในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 ประเภท คือ Acid Forming - Bacteria และ Acetogenic Bacteria โดยที่แบคทีเรียเหล่านี้จะมีทั้งพวกที่สามารถดำรงชีพอยู่ในสภาวะที่มี หรือไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative Anaerobic Bacteria) และพวกที่ดำรงชีพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระเลย (Obligate Anaerobic Bacteria) แต่จากที่พบในถังหมักส่วนใหญ่ ปรากฏว่ามีแบคทีเรียชนิด Obligate มากกว่าพวก Facultative Anaerobic Bacteria(59,71,102,104) แบคทีเรียเหล่านี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์พวกโปรตีน, คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ให้เป็นกรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ และอื่น ๆ

การย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดนี้อาจแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยได้ 2 ขั้นตอน คือ

ก. การย่อยสลายภายนอกเซลล์ โดยวิธีไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซีสเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์พวกโปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, และไขมัน ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่ ให้มีขนาดเล็กลง แบคทีเรียพวกแซพโพรไฟติค (Saprophytic Bacteria)จะปล่อยน้ำย่อยออกจากเซลล์ (Extracellular Enzyme) ตามชนิดของสารอินทรีย์ และย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลเล็กลง โดยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโน กลูโคส และกรีเซอรอล ตามลำดับ

ข. การย่อยสลายภายในเซลล์

ขั้นนี้แบคทีเรียจะดูดซึมสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กเข้าสู่เซลล์ย่อยสลาย ได้กรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 6 ตัว เรียกว่ากรดไวลาไทล์ (Volatile Acids) แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมทั้งสร้างเซลล์ใหม่ด้วย

การย่อยสลายกรดอะมิโน กลูโคส และกลีเซอรอลของแบคทีเรียส่วนใหญ่ต้องเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิค (Pyruvic Acid) ก่อนเสมอ แล้วกรดไพรูวิคจึงถูกย่อยสลายได้กรดอะซิติค และกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอื่น ๆ นอกนั้นเป็นแอลกอฮอล์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

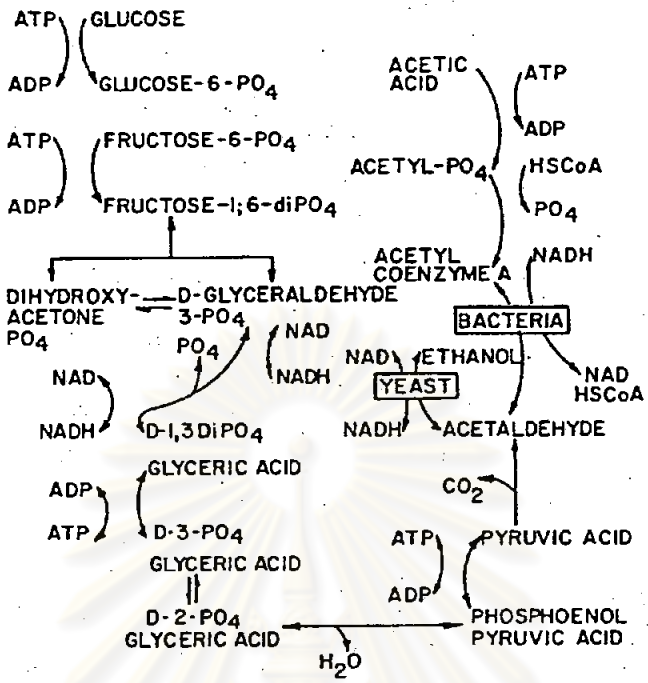
ตัวอย่างเช่น การย่อยสลายกลูโคสโดยผ่านขบวนการย่อยสลายที่เรียกว่า วิถีทางไกลคอลิซีส (Embden-Meyerhof-Parnas Pathway of Glycolysis) (ดูภาพที่ 3.2) ซึ่งให้ Intermediate Products เป็นกรดไพรูวิค และให้ End Products เป็นเอทธานอล

(เมื่อเป็นกระบวนการไกลโคลิซีสเกิดจากยีสต์) และ/หรือกรดอะเซติค (เมื่อกระบวนการไกลโคลิซีสเกิดจากแบคทีเรีย)

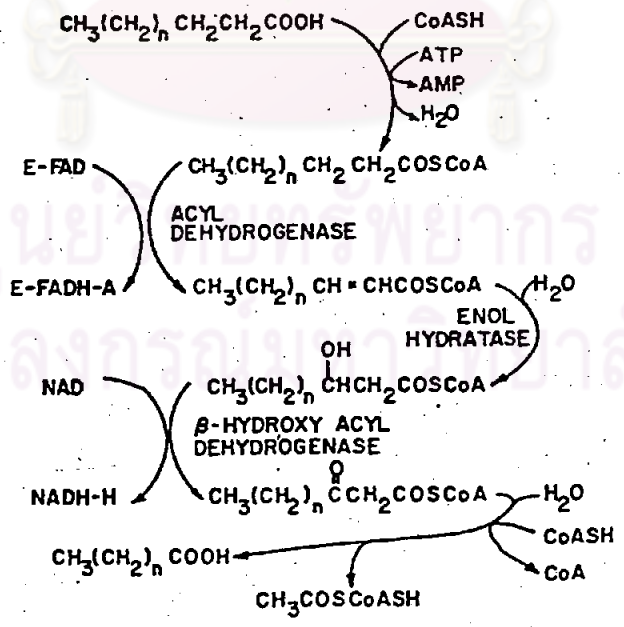
การย่อยสลายที่ไม่ผ่านกรดไพรูวิคก็มีบ้าง เช่น หนึ่งโมเลกุลของกลูโคสแตกตัว (Splitted) ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ได้ 2 โมเลกุลของกรดอะซิติค (64) หรือกรดอะซิติคสามารถเกิดได้จากการรวมตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ซึ่งเกิดโดยแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดชื่อ Clostridium aceticum หรือกรดไขมันที่มีขนาดใหญ่ (Long Chain Fatty Acids) จะมีการย่อยสลายแบบ Beta Oxidation (ดังภาพที่ 3.3)

แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กให้เป็นกรดไพรูวิค คือ แบคทีเรียที่สร้างกรด (Acid Forming Bacteria) ต่อจากนั้นกรดไพรูวิคก็จะถูกย่อยสลายต่อไปเป็นกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่กว่ากรดอะซิติค เช่น กรดโพรพิโอนิค (Propionic Acid) หรือกรดบิวทิริค (Butyric Acid) หรืออาจจะได้กรดอะซิติคเลยก็ได้

มีแบคทีเรียอีกชนิดในขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด ได้แก่แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น กรดบิวทิริค หรือกรดโพรพิโอนิค ให้เป็นกรดอะซิติค และก๊าซไฮโดรเจน เราเรียกปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซไฮโดรเจนว่า ไฮโดรเจนิซิส (Hydrogenesis) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนสามารถสร้างกรดได้ด้วย แต่แบคทีเรียที่สร้างกรดอาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจน จึงมีบางท่านจัดเอาแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่สร้างกรด แต่ในที่นี้ เราจะแยกแบคทีเรียที่สร้างกรด (Acid - Forming Bacteria) เป็นคนละพวกกับแบคทีเรียที่สร้างก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) ถ้าน้ำทิ้งที่ผ่านขั้นตอน Non-Methanogenic - Phase ไม่มีการสร้างไฮโดรเจน จะทำให้น้ำทิ้งมีซับสเตรต (Substrate) เหลืออยู่เกือบเท่าเดิม การที่ซับสเตรตถูกกำจัดออกไปเป็นส่วนน้อยมาก เพราะอิเล็คตรอนที่อยู่ในซับสเตรตเดิมจะถูกส่งต่อไปให้กับสารอินทรีย์ที่ยังคงอยู่ในน้ำทิ้ง ส่วนของซับสเตรตที่ลดน้อยลงไปมักเป็นผลมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ (Microbial Inefficiency) ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปของสารอินทรีย์เท่านั้น ดังนั้นเมื่อมีการสร้างไฮโดรเจนโดยที่อิเล็คตรอนถูกส่งให้กับไฮโดรเจนอิออน ทำให้ได้ก๊าซหนีออกไปจากระบบ จึงเป็นการลดอิเล็คตรอนของซับสเตรต ทำให้สภาวะออกซิเดชันลดลง ซึ่งเป็นการลดปริมาณซับสเตรตนั่นเอง



ภาพที่ 3.2 การย่อยสลายกลูโคสโดยผ่านขบวนการไกลคอลิซิส



ภาพที่ 3.3 การย่อยสลายกรดไขมันโดยผ่านขบวนการเบตาออกซิเดชัน

013504

3.1.2 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน

ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จากอะซิเตต (Acetoclastic Methane Bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (H_2-Utilizing Methane Bacteria) (ดูภาพที่ 3.1) แบคทีเรียเหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชแคบ ๆ เท่านั้น และอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตก็อยู่ในช่วง 30-35° ซ. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนทุกตัวล้วนเป็น Obligate Anaerobic Bacteria สมการที่ 3.1 และ 3.2 เป็นสมการที่แสดงการสร้างมีเทนจากแบคทีเรียทั้งสองประเภท เราเรียกสมการที่ 3.1 ว่าเกิดขบวนการ Acetate Decarboxilation และเรียกสมการที่ 3.2 ว่าเกิดขบวนการ Reductive Methane Formation กล่าวกันว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากขบวนการ Acetate Decarboxylation มีส่วนสำคัญในการสร้างมีเทนในระบบถึง 70 % ของมีเทนที่ได้ทั้งหมด

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad \text{.....(3.1)}$$

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \text{.....(3.2)}$$

โดยปกติแล้วแบคทีเรียประเภทที่สร้างมีเทนมักจะอยู่ร่วมกับแบคทีเรียประเภทอื่น ๆ โดยมีการพึ่งพาอาศัยกันที่จะปรับสภาพภายในระบบให้พอเหมาะแก่การหมัก ไม่ว่าจะเป็นพีเอช ไออาร์พี หรือปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่เล็กน้อย แต่ด้วยความพยายามกว่า 30 ปีของนักจุลชีพ - ทำให้สามารถแยกแบคทีเรียประเภทที่สร้างมีเทนให้เป็นเชื้อบริสุทธิ์ออกมาได้ โดยมันจะเจริญเติบโตได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างแท้จริง และต้องมีสภาพทางพีเอช ไออาร์พีที่พอเหมาะ ในตารางที่ 3.1 ได้แสดงชนิดของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทนที่เป็นเชื้อบริสุทธิ์ ซึ่งได้จัดลำดับเป็นหมวดหมู่โดย Balch และคณะ (20)

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน

3.2.1 อุณหภูมิ (Temperature)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนนั้น จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่สองช่วง คือ ช่วงการทำงานของมีโซฟิลิคแบคทีเรีย(Mesophilic Bacteria) จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30-40° ซ. และช่วงการทำงานของเทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย(Thermophilic Bacteria) จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 45-55° ซ. อุณหภูมิมีผลต่อการผลิตก๊าซของ

ตารางที่ 3.1 แสดงการจัดหมู่ของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนที่เป็นเชื้อบริสุทธิ์โดย Balch และคณะ

	Type strain	Former designation	Substrates for growth and CH_4 production
Order I. *Methanobacteriales* (type order)			
Family I. *Methanobacteriaceae*			
Genus I. *Methanobacterium* (type genus)			
1. *Methanobacterium formicicum* (neotype species)	MF	*Methanobacterium formicicum*	H_2, formate
2. *Methanobacterium bryantii*	M.o.H.	*Methanobacterium* sp. strain M.o.H.	H_2
Methanobacterium bryantii strain M.o.H.G.		*Methanobacterium* sp. strain M.o.H.G.	H_2
3. *Methanobacterium thermoautotrophicum*	ΔH	*Methanobacterium thermoautotrophicum*	H_2
Genus II. *Methanobrevibacter*			
1. *Methanobrevibacter ruminantium* (type species)	M1	*Methanobacterium ruminantium* strain M1	H_2, formate
2. *Methanobrevibacter arboriphilus*	DH1	*Methanobacterium arbophilicum*	H_2
Methanobrevibacter arboriphilus strain AZ		*Methanobacterium* sp. strain AZ	H_2
Methanobrevibacter arboriphilus strain DC		*Methanobacterium* strain DC	H_2
3. *Methanobrevibacter smithii*	PS	*Methanobacterium ruminantium* strain PS	H_2, formate
Order II. *Methanococcales*			
Family I. *Methanococcaceae*			
Genus I. *Methanococcus*			
1. *Methanococcus vannielii* (neotype species)	SB	*Methanococcus vannielii*	H_2, formate
2. *Methanococcus voltae*	PS	*Methanococcus* sp. strain PS	H_2, formate
Order III. *Methanomicrobiales*			
Family I. *Methanomicrobiaceae* (type family)			
Genus I. *Methanomicrobium* (type genus)			
1. *Methanomicrobium mobile* (type species)	BP	*Methanobacterium mobile*	H_2, formate
Genus II. *Methanogenium*			
1. *Methanogenium cariaci* (type species)	JR1	Cariaco isolate JR1	H_2, formate
2. *Methanogenium marisnigri*	JR1	Black Sea isolate JR1	H_2, formate
Genus III. *Methanospirillum*			
1. *Methanospirillum hungatii*	JF1	*Methanospirillum hungatii*	H_2, formate
Family II. *Methanosarcinaceae*			
Genus II. *Methanosarcina* (type genus)			
1. *Methanosarcina barkeri* (type species)	MS	*Methanosarcina barkeri*	H_2, CH_3OH, CH_3NH_2, acetate
Methanosarcina barkeri strain 227		*Methanosarcina barkeri* strain 227	H_2, CH_3OH, CH_3NH_2, acetate
Methanosarcina barkeri strain W		*Methanosarcina barkeri* strain W	H_2, CH_3OH, CH_3NH_2, acetate

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบคทีเรียอย่างมาก การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3° ซ. จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก (62)

3.2.2 <u>พีเอช กรดไวลาไทล์ และสภาพความเป็นด่าง</u> (pH, Volatile Acids, Alkalinity)

พีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.7-7.2 ซึ่งเหมาะแก่การทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.2 การควบคุมพีเอชในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนทำได้โดยการควบคุมปริมาณของกรดไวลาไทล์ (Volatile Acids) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) โดยปกติปริมาณกรดไวลาไทล์ควรมีค่าประมาณ 50-500 มก./ล. เมื่อคิดอยู่ในรูปของกรดอะซิติค หากปริมาณกรดไวลาไทล์มีมากกว่า 2000 มก./ล. แล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบกำจัดลดลง หรืออัตราส่วนระหว่างกรดไวลาไทล์และสภาพความเป็นด่างต้องไม่เกิน 0.3-0.4 (107) นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงพีเอชยังขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอีกด้วย โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) สภาพความเป็นด่าง และร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ 3.3 (14)

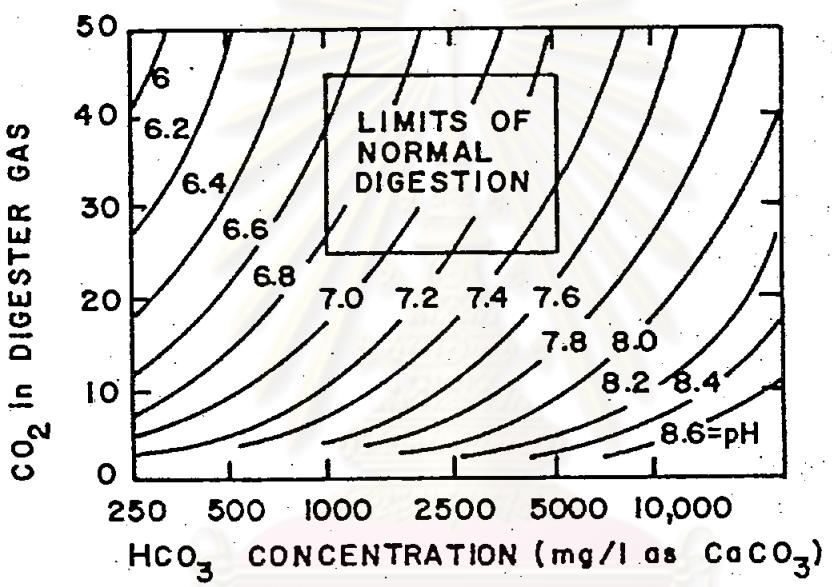
$$pH = 5.14 - \log(\%CO_2) + \log(HCO_3^- \text{ as mg/l } CaCO_3) \quad (3.3)$$

McCarty (74) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหมาะสม (ดังภาพที่ 3.4) และชี้ให้เห็นว่าสภาพความเป็นด่างไม่ควรต่ำกว่า 1000 มก./ล. เมื่อคิดในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อมิให้พีเอชต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อจุลชีพในระบบ

Pohland (82) ได้แสดงวิธีการควบคุมพีเอช โดยอาศัยความเป็นด่างเพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะกับการทำงานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยให้ชื่อว่า "Acid-Base Equilibrium Control" ซึ่งวิธีนี้สามารถบอกให้ทราบว่ากระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนขาดสภาพความเป็นด่างที่จะควบคุมพีเอชหรือไม่ ดังสมการที่ 3.4

$$BA = TA - 0.71\,TVA \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.4)$$

เมื่อ BA = ปริมาณความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate Alkalinity) ที่มากเกินพอหรือขาดไป (มก./ล. ในรูปของ $CaCO_3$)



ภาพที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีระหว่าง pH CO_2 และ สภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนตของถังหมักไร้ออกซิเจน (25)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TA = ปริมาณความเป็นด่างรวม (Total Alkalinity) วัดโดยการติเตรตถึงพีเอช 4.0 (มก./ล. ในรูปของ $CaCO_3$)

TVA = ปริมาณของกรดไวลาไทล์รวม (Total Volatile Acids) ที่มีอยู่ - (มก./ล. ในรูปของ CH_3COOH)

0.71 = ผลคูณของ (0.833)(0.85) โดยที่ 0.833 = $\frac{\text{นน.สมมูลย์ของ} CaCO_3}{\text{นน.สมมูลย์ของ} CH_3COOH}$ และ 0.85 คือ มีอะซิเตด 85 % จากกรดไวลาไทล์ เมื่อใช้วิธีติเตรตถึงพีเอช 4.0

ในสมการที่ 3.5 เป็นสมการที่ทำให้เราทราบว่ามีปริมาณความเป็นด่างเพียงพอหรือไม่ ถ้าหากปริมาณความเป็นด่างไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณความเป็นด่าง ซึ่งจะช่วยป้องกันมิให้พีเอชต่ำลงดังสมการ

$$N = A(E)(V) \quad \text{.....(3.5)}$$

เมื่อ N = ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้เติมลงไป, กิโลกรัม

A = ปริมาณของความเป็นด่างที่ขาดไป (มก./ล. ในรูปของ $CaCO_3$)

E = $\frac{\text{น้ำหนักสมมูลย์ของสารที่ต้องเติมลงไป}}{\text{น้ำหนักสมมูลย์ของ} CaCO_3}$

V = ปริมาตรของตัวถัง (Digester Volume), พันลูกบาศก์เมตร

3.2.3 <u>ศักยภาพการให้และรับอิเล็คตรอน</u> (Oxidation-Reduction Potential)

ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็คตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ซึ่งเกิดจากผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็คตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็คตรอน) ความแตกต่างทางด้านศักยภาพหรือความสามารถในการให้และรับอิเล็คตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองอาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล หรือเรียกสั้น ๆ ว่าไออาร์พี (ORP)

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ จึงต้องมีสารที่รับอิเล็คตรอน (Oxidizing Agent) และสารที่ให้อิเล็คตรอน (Reducing Agent) ควบคู่กันเสมอ สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียมักเป็นตัวที่ให้อิเล็คตรอนและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน จะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็คตรอน ซึ่งจะออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้มีพลังงานลดลง นั่นคือมีการปรับสภาพน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น ส่วนในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจะไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็คตรอน แต่จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ หรือกรดอะซิติคแทน

การนำไอออาร์พีมาใช้ควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียมิใช่แนวความคิดใหม่ที่เพิ่งเกิดขึ้น แต่มีการใช้กันมานานแล้ว โดยในปีค.ศ. 1906 Spita และ Weldert (96)ได้นำการวัดไอ-อาร์พีมาใช้ในงานกำจัดน้ำเสียครั้งแรกกับระบบแอคทิเวทเต็ดสลัดจ์ ต่อมาก็มีนักวิจัยอีกหลายท่านได้พยายามปรับปรุงและแก้ไขเพื่อนำมาใช้กับงานบำบัดน้ำเสียทั้งระบบที่ใช้และไม่ใช้ออกซิเจน

<u>ส่วนประกอบของเครื่องวัดไออาร์พี</u>

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

2. Reference Electrode อาจเป็น Hydregen Reference Electrodeซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความต่างศักย์มาตรฐาน(E_h) แต่ถ้า Reference Electrode เป็น - Calomel หรือ Silver-Silver Chloride ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ต้องนำมาแก้ไขให้เป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานตามสมการที่ 3.6

$$E_h = E + \text{Voltage of Reference Electrode} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.6)$$

เมื่อ E_h = ศักย์ไฟฟ้าจาก Hydrogen Reference Electrode

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

โดยกำหนด Voltage of Reference Electrode ไว้ดังนี้

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

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

Hydrogen Reference Electrode =0 mv.

3. Salt Bridge จะเป็นสะพานเชื่อมถ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายที่ถูกย่อยสลายกับ

4. Potentiometer

เนื่องจากค่าไออาร์พีจะบอกถึงอัตราส่วนสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ต่อสารที่เป็นตัวรีดิวส์รวมในระบบ หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือบอกเฉพาะความเข้มสัมพัทธ์ ไม่อาจบอกความจุหรือปริมาณอันแท้จริง เพราะปฏิกิริยารีดอกซ์มีการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดต่อความแม่นยำในการวัด ความสัมพันธ์ทางด้านปริมาณของปฏิกิริยารีดอกซ์อาจแสดงได้ในรูปสมการของเนินซท์ (Nernst Equation) ดังสมการที่ 3.7

$$E_h = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Oxidant})}{(\text{Reductant})} \qquad (3.7)$$

เมื่อ E_h = ศักย์ไฟฟ้าในระบบเมื่อเทียบจากไฮโดรเจนอิเล็คโทรด, โวลท์

E_o = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในระบบเมื่อปฏิกิริยาของสารออกซิแดนท์เท่ากับสารรีดักแทนท์ ที่ 25 °ซ, โวลท์

R = 8.315 (ค่าคงที่ของก๊าซ), โวลท์.คูลอมบ์

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, องศาเคลวิน

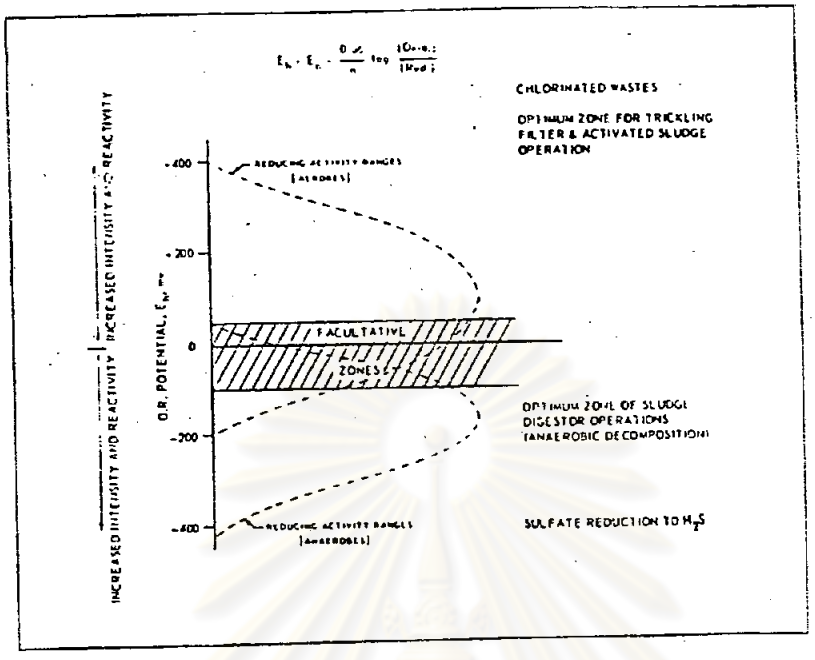
F = 96500 คูลอมบ์

n = จำนวนอิเล็คตรอนที่ถ่ายเทในปฏิกิริยารีดอกซ์

หรืออาจเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$E_h = E_o + \frac{0.0591}{n} \log \frac{(\text{Oxidant})}{(\text{Reductant})} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.8)$$

ในระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน อัตราส่วนของสารออกซิแดนท์ต่อรีดักแทนท์จะมีค่าสูง นั่นคือศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะมีค่าบวกมากกว่า แต่ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน อัตราส่วนนี้จะมีค่าต่ำ ศักย์ไฟฟ้าจึงมีแนวโน้มที่จะมีค่าติดลบ ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 พิสัยของโออาร์พีในระบบใช้ออกซิเจนและระบบไร้ออกซิเจน(46)

ข้อจำกัดของการวัดโออาร์พี

1. โออาร์พีเป็นผลจากอิทธิพลของสารออกซิแดนท์และรีดักแทนท์

2. ผิวของอิเล็คโทรดง่ายแก่การถูกเคลือบจากสารที่เกิดการถ่ายเทอิเล็คตรอน หรือการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization)

3. สารที่เป็นออกซิแดนท์หรือรีดักแทนท์ที่เข้มข้น จะทำให้ผิวอิเล็คโทรดมีปฏิกิริยาติดค้างอยู่ (Memory Effect)

4. พีเอชของสารละลายมีผลต่อการวัด เช่นการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr^{+6}

5. อุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อการวัดเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 มิลลิโวลท์ต่อ 1 °ซ. ที่เปลี่ยนแปลง)

แม้ว่าค่าโออาร์พีไม่อาจอธิบายสภาพที่แท้จริงของระบบขณะดำเนินไปได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เราก็สามารถนำมาประเมินลักษณะการเปลี่ยนแปลงของขบวนการได้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประโยชน์ของไออาร์พีในงานบำบัดน้ำเสีย

1. ใช้เพื่อควบคุมปัญหาด้านกลิ่นจากโรงบำบัดน้ำเสีย

2. ควบคุมการเติมอากาศในขบวนการย่อยตะกอน

3. ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน

4. ควบคุมปัญหาที่เกิดจากออกซิแดนท์หรือรีดักแทนท์ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่นควบคุมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์ หรือควบคุมการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr^{+6}

การนำเอาไออาร์พีมาใช้ควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่ามีตัวแปรที่มีผลต่อค่าที่วัดได้หลายประการ คือ

1. ชนิดของจุลชีพที่มีอยู่ภายในระบบ

2. สภาวะของจุลชีพ

3. วัฏภาคของการเจริญเติบโต (Growth Phase) ของมวลจุลชีพ

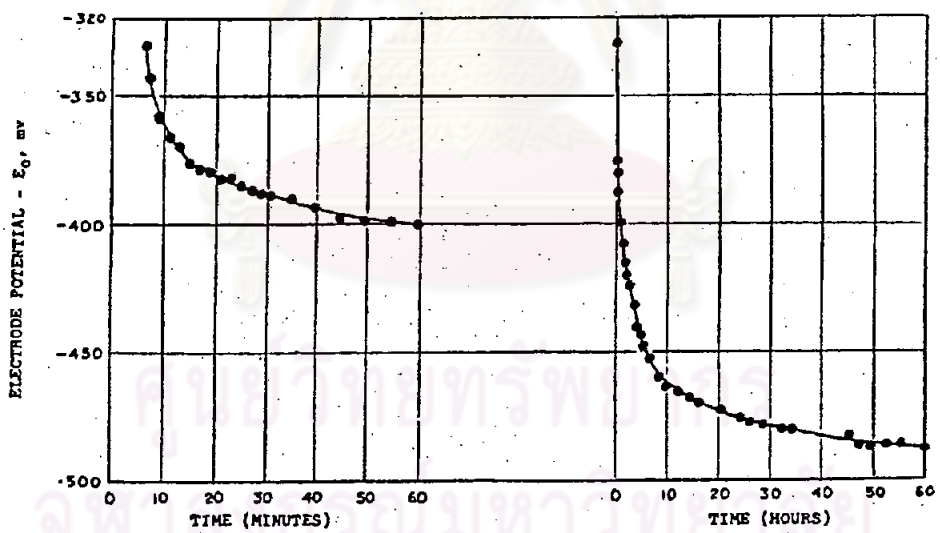
4. ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารภายในระบบ

5. สภาวะของการปฏิบัติในการควบคุมขบวนการ

6. ระยะเวลาในการวัด

ในปีค.ศ. 1936 Yudkin (109)พบว่าไม่ว่าจะวัดค่าไออาร์พี โดยพยายามให้หัวอิเล็คโทรดสัมผัสกับเซลล์จุลชีพ หรือสารอาหารภายในระบบ ค่าที่วัดได้จะไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก Reed และ Orr (85) รายงานว่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจะช่วยให้จุลชีพสามารถดำรงอยู่ได้ด้วยดี เมื่อมีการเติมสารอาหารที่เป็นพิษอย่างอ่อน ๆ ปรากฏว่าจุลชีพจะสร้างภูมิคุ้มกันเฉพาะแห่งขึ้นโดยการลดค่าไออาร์พีลง เพื่อปรับสภาพให้เหมาะแก่การเติบโต Longsworth และ MacInnes (69)ทดลองเลี้ยงแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และพบว่าศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ต่อการเกิดกรดและการสร้างมีเทน และให้ข้อสังเกตว่าค่าไออาร์พีจะเริ่มมีค่าคงที่ก่อนที่ระบบจะมีการผลิตก๊าซมีเทนได้ดี Clarkและคณะ (27) สังเกตว่าในระยะแรกของวัฏภาคแห่งการเจริญเติบโต ค่าไออาร์พีที่วัดได้จะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นระยะเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการวัด และสิ่งนี้ทำให้การวัดไออาร์พีในระยะแรกมีข้อที่แตกต่างกัน ในปีค.ศ. 1905 - Molof (32) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้วัดกับค่าไออาร์พี ทำให้เขาพบความสัมพันธ์ดังกราฟภาพที่ 3.6 ในช่วงระยะเวลา 60 นาทีแรก จะสังเกตเห็นว่าค่าไออาร์พี

จะเริ่มมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ปรากฏว่า ณ จุดสมดุลย์นี้เป็นจุดสมดุลย์เทียม (Pseudo-Equilibrium) เพราะเมื่อระยะเวลาผ่านไปปรากฏว่าค่าโออาร์พีจะลดลงได้อีก จนเข้าสู่สมดุลย์จริงที่ระยะเวลาเข้าใกล้ 60 ชั่วโมงต่อมา เขาจึงเสนอว่าเวลาที่เหมาะสมในการวัดควรประมาณ 10-48 ชั่วโมง และแม้ว่าจะใส่อิเล็คโทรดวัดในถังหมักนานถึง 6 เดือน ปรากฏว่าอิเล็คโทรดยังคงทำงานได้ดีโดยปราศจากการสูญเสียความไว (Sensitivity) และเขายังได้พบอีกว่าไม่มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอิเล็คโทรดที่ทำจากทองหรือทองคำขาว ขณะที่มีการเพิ่มสลัดจ์ใหม่เข้าสู่ถังหมัก หรือมีอากาศเล็ดลอดเข้าไป หรืออุณหภูมิที่ลดลง ก็มีส่วนทำให้ค่าโออาร์พีที่วัดได้มีค่าเพิ่มมากกว่าเดิม (มีค่าบวกเพิ่มขึ้น) Eckenfelder และ Hood (34) ได้เสนอว่าควรใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) ช่วยขณะทำการวัดด้วย



ภาพที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโออาร์พีกับระยะเวลาในการวัด Molof(32)

จากงานวิจัยต่าง ๆ ปรากฏว่ามีผู้วัดค่าไออาร์พีในสภาวะไร้ออกซิเจนได้ค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับค่าไออาร์พีที่วัดได้ในสภาพไร้ออกซิเจน

ผู้วิจัย	ไออาร์พี(E_h), มิลลิโวลท์	หมายเหตุ
Smith & Hungate	-335 ถึง -346	ศึกษาจากการดำรงชีพของมีเทนแบคทีเรีย
Reed & Orr	-200	ศึกษาจากแบคทีเรีย 15 ชนิด จำพวก Clostridium Spp.
Maslova & Pantskhava	-316 ถึง -356	ศึกษาจากถังหมักที่อุณหภูมิเทอร์-ไมฟิลิคส์
Molof	-220 ถึง -290	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Dirasian	-276 ถึง -286	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Hewitt	+50 ถึง -400	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Grune	-130 ถึง -223	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจนที่-รับน้ำเสียจากบ้านเรือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 ความต้องการสารอาหารที่จำเป็น (Nutrient Requirement)

ในเซลล์ของจุลชีพจะประกอบไปด้วย คาร์บอน(C) ไนโตรเจน(N) ฟอสฟอรัส(P) และซัลเฟอร์(S) ในอัตราส่วน C:N:P:S = 100:10:1:1 (77) ดังนั้นเพื่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีพของจุลชีพ จึงต้องมีสารอาหารที่เพียงพอ Speece และ McCarty (95) ได้แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระต้องการธาตุไนโตรเจน เมื่อเทียบกับน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (Cell Weight/N = 9.4) Sanders และBloodgood (91) ได้ทำการศึกษาพบว่า จุลชีพชนิดไม่ต้องการออกซิเจนอิสระต้องการฟอสฟอรัสเท่ากับ 1 ใน 7 ของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่ประกอบเป็นเซลล์ (N/P = 7) และ McCarty (74)กล่าวว่าปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วนดังนี้ BOD_L:N:P = 100:1.1:0.2

3.2.5 สารพิษ (Toxic Materials)

น้ำทิ้งที่จะนำมากำจัดสารอินทรีย์ทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจนจะต้องไม่มีสารเป็นพิษต่อจุลชีพ ความรุนแรงของพิษขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ๆ McCarty (74)พบว่าความเป็นพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ซึ่งจะยับยั้งการทำงานของจุลชีพ (Inhibited)แต่อย่างไรก็ตามถ้าสารเหล่านี้มีปริมาณน้อยพอเหมาะก็อาจช่วยให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นได้ สารที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งทางชีววิทยาแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

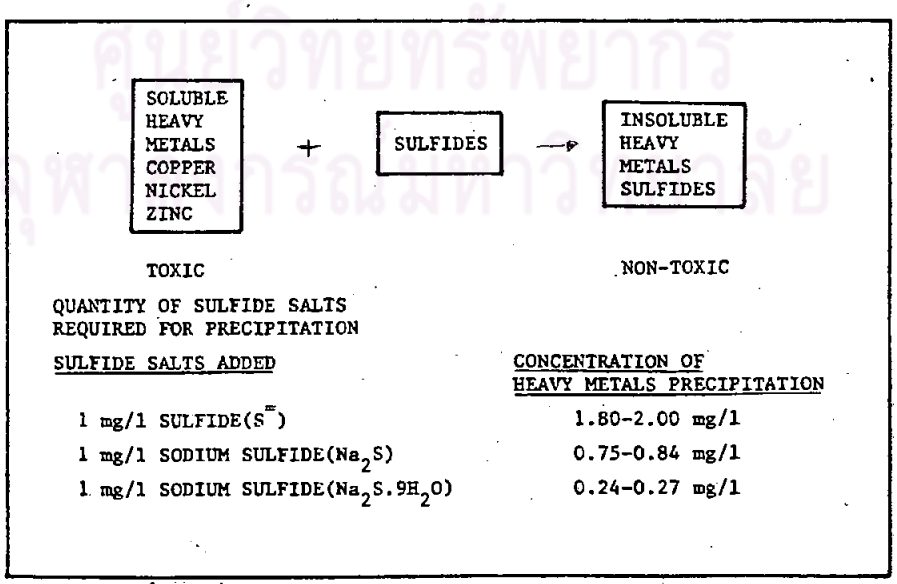
3.2.5.1 พิษของกรดโวลาไทล์ (Volatile Acid Toxicity)

กรดโวลาไทล์เป็นพิษต่อจุลชีพพวกที่สร้างมีเทนเพราะการที่เกิดกรดโวลาไทล์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้พีเอชลดลงซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลชีพ Kotze และคณะ (62) กล่าวว่า โมเลกุลของกรดอ่อน (Weak Acid) และด่างอ่อน (Weak Base) ที่ไม่แตกตัวเป็นอิออน (Ionic Form) นั้นสามารถผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลชีพได้เร็วมาก เช่นกรดอ่อนที่พีเอชต่ำจะไม่แตกตัวเป็นอิออน เมื่อผ่านเข้าเซลล์จุลชีพจะผ่านได้ง่าย ทำให้พีเอชภายในเซลล์จุลชีพลดลง จุลชีพจึงตายและด่างอ่อนที่พีเอชสูงก็ให้ผลเช่นเดียวกัน

3.2.5.2 พิษของอิออนหรือโลหะหนัก (Ion or Heavy Metal Toxicity)

ระดับความเป็นพิษของอิออนหรือโลหะหนักถ้ามีมากเกินจำนวนหนึ่งก็จะเกิดการเป็นพิษต่อจุลชีพในระบบได้ อิออนที่สำคัญได้แก่ Na^{+}, K^{+}, Mg^{2+}, Ca^{2+} และ S^{2-} โดยปกติอิออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนลบ McCarty และ McKinney (73) กล่าวว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อแบคทีเรียน้อยกว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะมากกว่าพิษของ Ca^{2+}และMg^{2+}ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของอิออนบวกจะเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซี่สูงขึ้น และน้ำหนักอะตอมเพิ่มมากขึ้น เราสามารถลดความเป็นพิษของอิออนบวกได้โดยการทำแอนทาโกนิสซึม (Antagonism) คือเมื่ออิออนบวกอยู่ร่วมกันในความเข้มข้นที่พอเหมาะ พิษของอิออนบวกชนิดหนึ่งสามารถลดความเป็นพิษของอิออนอีกชนิดหนึ่งได้ เช่น พิษของ Na^{+} เข้มข้น 3500 มก./ล. สามารถจะทำให้หมดไปได้ถ้ามี Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50-1000 มก./ล.(73) แต่ในทางตรงกันข้าม อิออนบวกบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของอิออนอีกชนิดหนึ่งเมื่ออยู่ร่วมกัน เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ซินเนอร์ยิสซึม (Synergism)

ส่วนพิษของโลหะหนักได้แก่ แมงกานีส, สังกะสี, แคดเมี่ยม, นิเกิล, โคบอลท์, ทองแดง และโครเมี่ยม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของอิออน อนึ่ง พิษของโลหะหนักจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือของโลหะหนักขึ้นมา ซึ่งจะไม่ละลายน้ำ (74)(ดังภาพที่ 3.7) ทั้งความเข้มข้นของอิออนและโลหะหนักที่จะเกิดเป็นพิษต่อระบบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.7 ปฏิกิริยาการทำลายพิษของโลหะหนักโดยซัลไฟด์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 3.3 แสดงความเข้มข้นของอิออนและโลหะหนักที่เกิดเป็นพิษต่อระบบหมักโดยตรง

อิออนและโลหะหนักที่เป็นพิษ	ความเข้มข้น		ผลที่มีต่อระบบ
	โมล/ลบ.ดม.	มก./ลบ.ดม.	
Na^+	0.2	4,600	เริ่มมีการยับยั้งการทำงาน (inhibition)
	0.4	9,200	หยุดการทำงาน (complete inhibition)
K^+	0.05–0.10	1,900–3,900	ไม่มีผล (no inhibition)
	> 0.1	> 3,900	เริ่มมีการยับยั้งการทำงาน
	0.35	13,650	หยุดการทำงาน
Mg^{2+}	> 0.05	1,200	เริ่มมีการยับยั้งการทำงาน
	0.2	4,800	หยุดการทำงาน
Ca^{2+}	0.075	3,000	เริ่มมีการยับยั้งการทำงาน
	> 0.2	> 8,000	หยุดการทำงาน
S^{2-}	–	150–250	เริ่มมีการยับยั้งการทำงาน
	–	800	หยุดการทำงาน
Cu	–	397	ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นลดลงเหลือร้อยละ 24 ของเกณฑ์ควบคุม
Zn	–	> 500	หยุดการเกิดก๊าซ
	–	350–400	ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นลดลงเหลือเพียงร้อยละ 5 ของเกณฑ์ควบคุม
	–	1,000	บักเตรีถูกทำลายหมด (completely toxic)
Ni	–	200	บักเตรีเริ่มถูกทำลาย
	–	367	ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นลดลงเหลือเพียงร้อยละ 23 ของเกณฑ์ควบคุม
	–	500–1,000	บักเตรีถูกทำลายอย่างรุนแรง (serious toxic)
	–	> 1,000	บักเตรีถูกทำลายหมด
Cr	–	200	บักเตรีเริ่มถูกทำลาย
	–	2,000	บักเตรีถูกทำลายหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5.3 พิษของก๊าซบางชนิด

พิษของแอมโมเนีย (Ammonia Toxicity) แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบกำจัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ด้วย คือพวกโปรตีน หรือยูเรีย (Urea) ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยสารสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาได้ขึ้นกับพีเอช ดังแสดงในสมการที่ 3.9

$$NH_4^+ \longleftrightarrow NH_3 + H^+ \quad \text{.....(3.9)}$$

ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ซึ่ง NH_3 จะยับยั้งการทำงาน และเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่า NH_4^+ (74) ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N) ซึ่งวิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการจะรวมทั้ง NH_3 และ NH_4^+ ในตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบกำจัดน้ำทิ้งแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ตารางที่ 3.4 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบกำจัดน้ำทิ้งแบบไม่ใช้ออกซิเจน (74)

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

การลดพิษของแอมโมเนียไนโตรเจนทำได้โดยการเจือจาง (Dilution) น้ำทิ้งก่อนเข้าสู่ระบบกำจัด หรืออาจกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนก่อนเข้าสู่ระบบกำจัด

พิษของซัลไฟด์ (Sulfide Toxicity) ในระบบกำจัดน้ำทิ้งทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดการเป็นพิษของซัลไฟด์ต่อแบคทีเรียเมื่อ น้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบกำจัดมีปริมาณของซัลไฟด์มาก หรือเกิดการย่อยสลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือเกิดการย่อยสลายโปรตีน ซัลไฟด์ในระบบกำจัดน้ำทิ้งแบบไร้ออกซิเจนอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำ

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิออนบวกที่รวมอยู่ ถ้ารวมกับไลหะหนักก็จะตกตะกอนลงมา ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริคได้ (H_2SO_4) แบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระสามารถทนต่อซัลไฟด์ที่ละลายน้ำอันมีความเข้มข้นถึง 50 ถึง 100 มก./ล. แต่ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดนี้ (74)

การลดพิษของซัลไฟด์ทำได้โดยการทำให้ตกตะกอนของซัลไฟด์ การทำให้น้ำทิ้งเจือจาง หรือโดยการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำทิ้งก่อนเข้าระบบ

3.2.5.4 <u>พิษของสารอินทรีย์</u> (Toxic Organic Material)

สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ สารพวกนี้ได้แก่แอลกอฮอล์ (Alcohol) และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (Long Chain Fatty Acid) เช่น แอลกอฮอล์พวกเมทานอล (Methanol) ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบกำจัดอย่างสม่ำเสมอ (Continuous Feed) เพื่อทำให้แบคทีเรียคุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10000 มก./ล.ก็ตาม (74) หรืออาจแก้ไขโดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ

3.3 <u>การใช้ระบบหมักแบบเครื่องกรองไร้ออกซิเจน</u>

3.3.1 <u>ลักษณะการทำงานของเครื่องกรองไร้ออกซิเจน</u>

เครื่องกรองไร้ออกซิเจน เป็นเครื่องมือกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยจุลชีพชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ อาจสร้างเป็นถังรูปทรงกระบอก หรือสี่เหลี่ยมก็ได้ ภายในบรรจุตัวกลาง (Filter Media) โดยมีการป้อนน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นสู่ตอนบน ลักษณะการไหลภายในเป็นแบบปลั๊กโฟล (Plug Flow) จุลชีพภายในถังกรองจะมีความเป็นอยู่สองลักษณะ คือ เกาะหลวม ๆ อยู่กับตัวกลางลักษณะหนึ่ง และอยู่ในช่องว่างระหว่างตัวกลางอีกลักษณะหนึ่ง เมื่อน้ำทิ้งไหลเข้าสู่ส่วนล่างของเครื่องกรอง และสัมผัสกับจุลชีพที่ตกตะกอนอยู่ก้นถัง จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ ก๊าซเหล่านี้จะเกาะอยู่ตามตะกอนจุลชีพ เมื่อน้ำทิ้งไหลผ่านเครื่องกรอง ความเร็วของน้ำทิ้งจะพาเอาก๊าซและตะกอนจุลชีพลอยขึ้นสู่ส่วนบนของถัง สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจะยังคงถูกย่อยสลายโดยตะกอนจุลชีพที่ถูกพาขึ้นมาและ

จุลชีพที่เกาะติดอยู่กับตัวกลางที่น้ำทิ้งไหลผ่านการลอยขึ้นของตะกอนจุลชีพจะทำให้ตะกอนจุลชีพกระทบกับตัวกลาง ก๊าซที่เกาะติดอยู่จึงหลุดออก เมื่อตะกอนจุลชีพรวมตัวกันมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น ตะกอนจึงตกลงมายังส่วนล่างของถังซึ่งเป็นการนำเอาตะกอนจุลชีพกลับมาใช้ในระบบอีก (Recycle) ตะกอนขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาจะติดออกมาพร้อมกับฟองก๊าซที่หลุดออกมากับน้ำทิ้งจากเครื่องกรอง ซึ่งก็คือตะกอนจุลชีพที่ระบบกำจัดต้องสูญเสียไป นอกจากนั้นตัวกลางยังทำหน้าที่กระจายการไหลของน้ำ ทำให้น้ำทิ้งได้สัมผัสกับจุลชีพอย่างทั่วถึงโดยไม่เกิดการลัดวงจรอีกด้วย

3.3.2 <u>การทดลองระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนกับน้ำเสียความเข้มข้นต่ำที่ผ่านมา</u>

Coulter และคณะ (29) ได้เป็นผู้ริเริ่มนำเอาระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมาใช้กับน้ำเสียจากบ้านเรือนและแหล่งชุมชน โดยใช้ระบบถังหมักแบบสัมผัส (Anaerobic Contact Tank) แล้วตามด้วยเครื่องกรองไร้ออกซิเจนขนาดทดลองซึ่งมีความจุ 10-ลิตร เพื่อกำจัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นบีโอดีเฉลี่ย 180 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 20-25 °ซ. ด้วยระยะเวลากักเก็บน้ำ 36 ชม. ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีถึงร้อยละ 86

Pretorius (84) ได้ศึกษาระบบที่คล้ายกับของ Coulter โดยใช้ถังหมักแบบสัมผัส แล้วตามด้วยเครื่องกรองขนาดห้องปฏิบัติการความจุ 16 ลิตร กำจัดน้ำเสียจากบ้านในประเทศอัฟริกาใต้ ซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย 550 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 20 °ซ. ด้วยระยะเวลากักเก็บน้ำ 24 ชม. ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 78

Raman และ Chakladar (86) ได้ศึกษาเครื่องกรองไร้ออกซิเจนขนาด 4.00x2.25 ฟุต ภายในบรรจุอิฐหัก 3 ชั้น ชั้นล่างสุดขนาด 0.5-0.75 นิ้ว สูง 15 นิ้ว ชั้นกลางขนาด 0.25-0.5 นิ้ว สูง 9 นิ้ว ชั้นบนสุดขนาด 0.063-0.25 นิ้ว สูง 3 นิ้ว กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากถังเกรอะ (Septic Tank Effluent) มีความเข้มข้นซีโอดี 344 ถึง 648 มก./ล. ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 33-74

Raman และ Khan (88) ได้ศึกษาเครื่องกรองไร้ออกซิเจนขนาด 1.61 คูณ 1.61 ม. สูง 1.4 ม. ภายในบรรจุหินขนาด 2.5-3.5 ซม. สูง 1.20 ม. ทำความสะอาดน้ำเสียจากบ้านเรือนที่มีความเข้มข้นบีโอดี 115-238 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 27.5 °ซ. โดยมีระยะเวลากักเก็บน้ำ 6.4 ชม. ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีโดยเฉลี่ยร้อยละ72.5

บุญสิน สุภัควงศ์ (4) ได้ศึกษาเครื่องกรองไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ภายในบรรจุหินกรองขนาด 2.5-5.0 ซม. โดยมีความสูงของหินกรอง 0.5 และ 1.0 ม. กำจัดน้ำเสียจากถังเกรอะซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีโดยเฉลี่ย 160 มก./ล. - ปรากฏว่าเครื่องกรองที่บรรจุหินกรองสูง 0.5 ม. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2.5-18 ซม. สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 46 ถึงร้อยละ 72 ส่วนเครื่องกรองที่บรรจุหินกรองสูง 1.0 ม. ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4.5-32 ซม. สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 51 ถึงร้อยละ 80

Genung และคณะ (43) ได้ศึกษาเครื่องกรองไร้ออกซิเจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.84 ม. สูง 6 ม. กำจัดน้ำเสียจากบ้านเรือนที่มีความเข้มข้นบีโอดี 60-220 - มก./ล. ที่อุณหภูมิ 15-20 °ซ. โดยมีระยะเวลากักเก็บน้ำ 2.5-10.5 ซม. รับน้ำเสียในอัตรา 19 ลบ.ม./วัน ปรากฏว่าเครื่องกรองมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีร้อยละ 55

Kobayashi (61) ได้ศึกษาเครื่องกรองไร้ออกซิเจนขนาดห้องปฏิบัติการทำด้วยท่อ โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 37 นิ้ว กำจัดน้ำเสียจากบ้านเรือนซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีโดยเฉลี่ย 288 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 20, 25 และ 35 °ซ.ตามลำดับ รับออร์แกนิคโหลดดิง 0.32 กก./ลบ.ม.-วัน ปรากฏว่าเครื่องกรองมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 73 ที่อุณหภูมิ 25 และ 35 °ซ. จะไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่อุณหภูมิ 20 °ซ. ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 0.12 ล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ก๊าซชีวภาพจะประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 30 มีเทนร้อยละ 65 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5 น้ำทิ้งที่ได้จากเครื่องกรองจะมีกลิ่นจากซัลไฟด์

Lettinga และคณะ (67) ได้ศึกษาระบบ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เพื่อนำมาบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์มีขนาด 120 ล. สูง 2 ม. ภายในบรรจุเม็ดชั้นสลัดจ์ (Granular Sludge Bed) โดยการเลี้ยงชั้นสลัดจ์ให้มีสภาพพอเหมาะแก่การรวมเป็นกลุ่มก้อนจากการใช้สารช่วยตกตะกอน รับน้ำเสียที่มีซีโอดีเข้าเฉลี่ย 343 มก./ล. ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 66-85 ที่อุณหภูมิ 8-20 °ซ. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงฤดูร้อน 0.22 ล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ในฤดูฝนปริมาณก๊าซจะลดลงเหลือ 0.14 ล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด และในฤดูหนาวอัตราการผลิตก๊าซจะเหลือเพียง 0.10 ล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 2-4 ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 14-22 อัตราส่วนของก๊าซไน -

ไดรเจนจะขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซชีวภาพรวม ถ้าปริมาณก๊าซชีวภาพรวมต่อปริมาตรน้ำเสียที่ถูกบำบัดมีค่าสูง ปรากฏว่าส่วนประกอบของก๊าซไนไดรเจนจะลดลง โดยจะมีก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้น

3.3.3 <u>ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของเครื่องกรองไร้ออกซิเจน</u>

<u>ข้อได้เปรียบของเครื่องกรองไร้ออกซิเจน</u>

1. ลดการสิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศให้กับระบบกำจัด เพราะการย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่มีการใช้ออกซิเจนอิสระ

2. เหมาะกับประเทศในเขตร้อน เช่นประเทศไทย เพราะไม่ต้องเสียพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบกำจัด เช่นประเทศในเขตหนาว

3. ความต้องการสารอาหารเสริม (Nutrient) น้อยกว่าระบบกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งแบบใช้ออกซิเจนอิสระ (Aerobic Treatment)

4. มีผลพลอยได้คือก๊าซมีเทน ซึ่งนำไปใช้เป็นพลังงานได้

5. ลดปัญหาในการกำจัดกากตะกอน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายจะเปลี่ยนเป็นมวลจุลชีพประมาณร้อยละ 10-20 ในขณะที่ระบบใช้ออกซิเจนอิสระเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายเป็นมวลของจุลชีพประมาณร้อยละ 50

6. ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการเวียนตะกอนกลับ (Sludge Recycle) เพราะตัวกลางภายในเครื่องกรองจะทำหน้าที่ดักตะกอนให้กลับคืนสู่ระบบได้

7. มีระยะเวลากักเก็บตะกอนสูง (Solid Retention Time) ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงตามด้วย

<u>ข้อจำกัดของเครื่องกรองไร้ออกซิเจน</u>

1. ใช้ระยะเวลาในการเริ่มเลี้ยงจุลชีพ (Start Up) นาน เพราะจุลชีพเจริญเติบโตช้า

2. ระบบกำจัดปรับตัวไม่ดีนักต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำทิ้ง ปริมาณสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ

3. น้ำทิ้งที่ออกจากระบบกำจัดจะมีกลิ่น และมีสีดำ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่มีกลิ่น เมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบโลหะต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจะทำให้เกิดสารประกอบสีดำ