

ทฤษฎีและรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment Process) นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือ กระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (aerobic treatment process) และกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (anaerobic treatment process) ซึ่งในการจะเลือกใช้กระบวนการบำบัดแบบไหนนั้นก็ต้องพิจารณาจากเหตุผลหลาย ๆ ประการด้วยกัน เช่น ชนิดของ น้ำเสีย ประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าก่อสร้าง ขนาดพื้นที่ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและอื่น ๆ ข้อได้เปรียบประการสำคัญประการหนึ่งที่กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศเหนือกว่ากระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศก็คือ การไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศให้แก่ระบบบำบัด เพราะการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียไม่มีการใช้ออกซิเจนอิสระ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และการดูแลรักษาน้อยลงไป ดังนั้นในปัจจุบัน กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และยังคงได้รับการพัฒนาวิธีการใหม่ ๆ ขึ้นอีกมากมาย

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้ตัดสินใจเลือกใช้ระบบบำบัดแบบถัง เกรอะ และถังกรองไร้อากาศแบบ Upflow ดังนั้นในที่นี้ จึงจะเลือกกล่าวเฉพาะระบบบำบัดที่ เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้พอเป็นสังเขปดังนี้

2.1 บ่อเกรอะ (Septic Tank)

ระบบนี้ได้เริ่มใช้งานในประเทศอังกฤษ เมื่อปี ค.ศ. 1895 โดย Cameron ได้อาศัยต้นแบบจาก Muras Automatic Scavenger ของ M. Louis Mouras (ค.ศ. 1881 และ 1882) มาพัฒนาใช้ในการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งผ่านการกรองมาแล้ว และยังได้มีการพัฒนารูปแบบเรื่อยมา ระบบนี้

อาศัยหลักการของการตกตะกอน และการย่อยสลายแบบไร้อากาศมาใช้ ซึ่งพอจะสรุปกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เป็น 4 ขั้นตอนง่าย ๆ คือ

1. กระบวนการแยกตัวของของแข็งที่ปนอยู่ในน้ำทิ้ง (Separation of Suspended Solids) ซึ่งจากกระบวนการนี้จะทำให้เกิดพื้นที่ภายในถังเกรอะเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

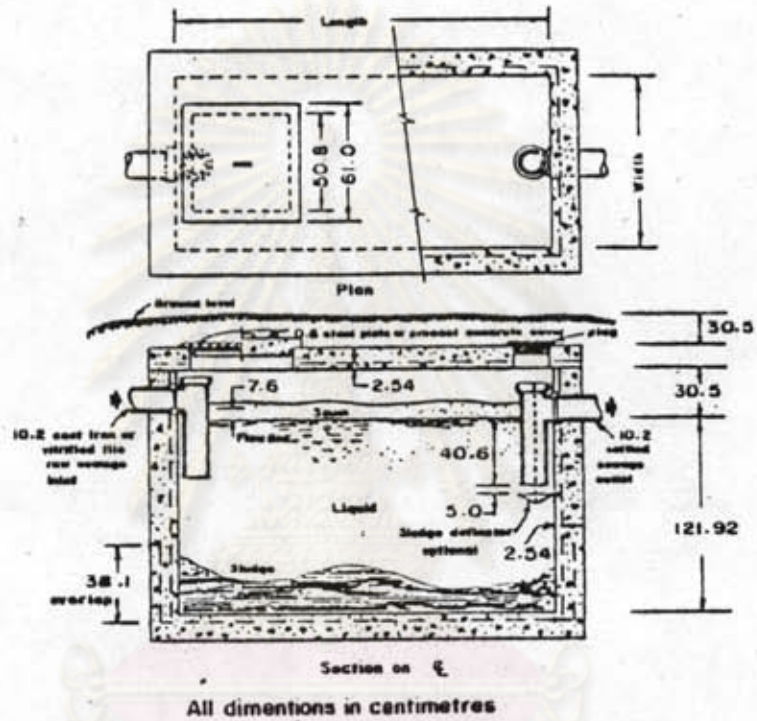
- ก. ส่วนที่เป็นชั้นของตะกอนที่จมอยู่ก้นถัง (Sludge Zone)
- ข. ส่วนที่เป็นชั้นของตะกอนที่ลอยอยู่ผิวน้ำ (Scum Zone)
- ค. ส่วนที่เป็นชั้นของของเหลว ซึ่งอยู่ในส่วนกลางของถัง (Liquid Zone)

2. การย่อยสลายตะกอนจมและตะกอนลอย (Digestion of Sludge and Scum) สารอินทรีย์ในตะกอนจม และตะกอนลอยจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่อยู่ในถังตามกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

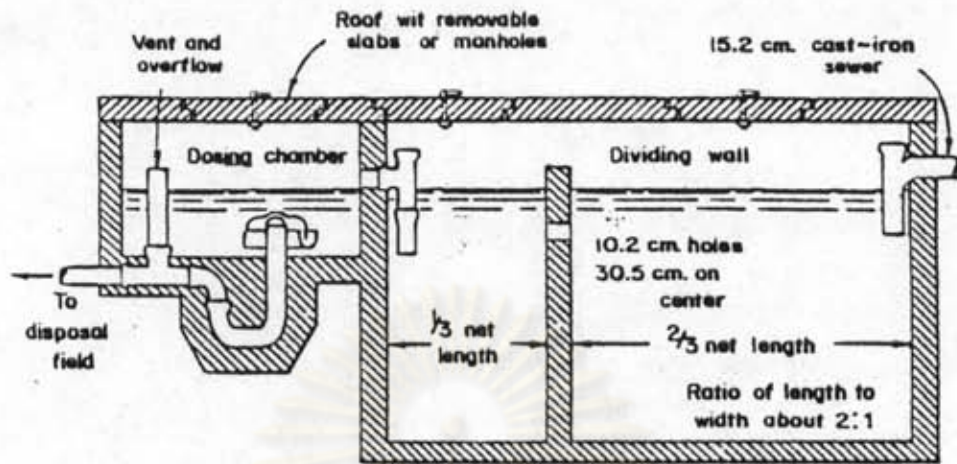
3. การบำบัดของเหลวให้มีสภาพดีขึ้น (Stabilization of Liquid) สารอินทรีย์ในของเหลวก็จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย เช่นเดียวกับกระบวนการในข้อที่ 2

4. การเจริญเติบโตของจุลชีพ (Growth of micro - organisms) ภายในถังจะเกิดจุลชีพชนิดต่าง ๆ ขึ้นมากมายหลายชนิด โดยปริมาณจุลชีพแต่ละชนิดจะถูกควบคุมโดยสภาพแวดล้อมภายในถัง

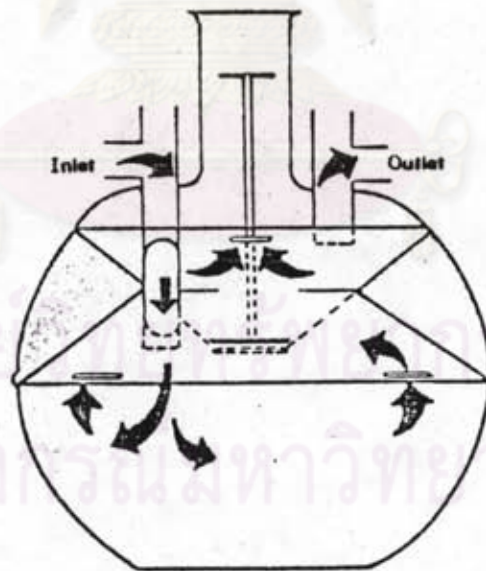
ในปัจจุบันถัง เกรอะนิยมนำมาใช้กับน้ำเสียที่มาจากอาคารบ้านเรือน โดยจะสร้างเป็นถังคอนกรีตสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ใต้ดิน และมีเวลาเก็บกักประมาณ 1 - 3 วัน ดังภาพที่ 2.1 ระบบนี้ยังคงมีการสะสมตัวของตะกอนจมเนื่องมาจากตะกอนจมบางส่วนแบคทีเรียไม่สามารถจะทำการย่อยสลายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดตะกอนจมเหล่านี้ออกทุก ๆ 1 - 5 ปี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาพที่ 2.1 - a ดังประกอบ (50)



ภาพที่ 2.1 - บ ดังเกรอะ (51)



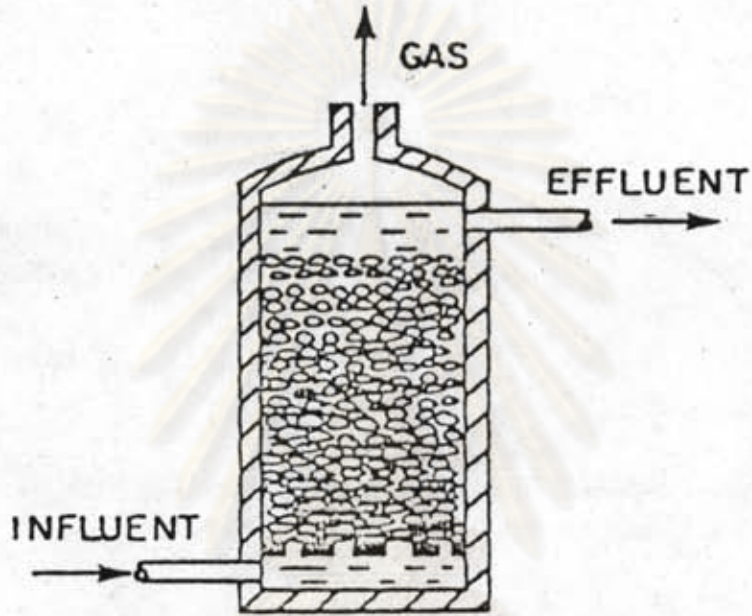
ภาพที่ 2.1 - ค ดังเกรอะ (52)

2.2 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)

ระบบนี้คิดค้นและพัฒนาโดย Young และ McCarty (33) ซึ่งการค้นพบนี้ตรงกับทฤษฎีที่ใช้ในภายหลังว่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลากักเก็บตะกอน (Solid Retention Time) มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด (34) และพบว่าการหลุดออกไป (Wash Out) ของมีเทนแบคทีเรีย เมื่อมีค่าเวลากักเก็บตะกอนที่ต่ำกว่า 4 วัน ทำให้มีการพัฒนาระบบนี้ขึ้น เพื่อมุ่งหวังให้ระยะเวลาในการกักเก็บตะกอนสูงกว่าระบบอื่น ๆ ในระบบนี้จะประกอบไปด้วย ถังรูปทรงกระบอกมีฝาปิด ที่ฝาปิดจะมีรูระบายก๊าซ ภายในมีตัวกลาง (media) ซึ่งจะหน่อการกักคร่อนบรจุอยู่ (ดังภาพที่ 2.2) โดยแบคทีเรียจะเกาะติดอยู่กับผิวของตัวกลาง และเมื่อน้ำไหลผ่านตัวกลาง แบคทีเรียก็จะจับเอาสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปย่อยสลายแบบไร้อากาศ เพื่อใช้ในการดำรงชีวิต ตัวกลางจะช่วยในการกระจายการไหลของน้ำให้เข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้น้ำเสียสัมผัสกับแบคทีเรียได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งยังช่วยในการแยกก๊าซให้ออกจากตะกอน จุลชีพอีกด้วย

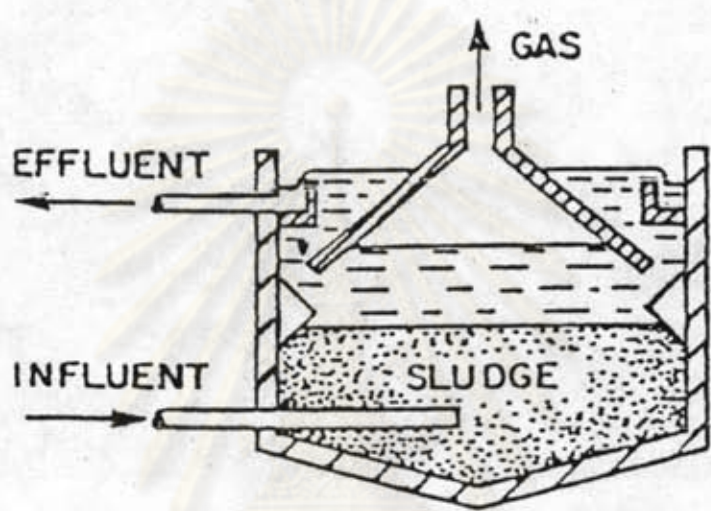
2.3 ระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)

ระบบนี้ได้เริ่มค้นศึกษาในประเทศเนเธอร์แลนด์ โดย Dr. Letinga ในปี ค.ศ. 1972 เป็นระบบที่อาศัยชั้นของตะกอนจุลชีพซึ่งรวมตัวกันเป็นเม็ดผลึกที่มีน้ำหนักจมอยู่ก้นถังแล้วลอยน้ำเสียให้ไหลผ่านจากด้านล่างผ่านชั้นตะกอนนี้ และกลุ่มของจุลชีพในชั้นตะกอนก็จะดึงเอาสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ผ่านเข้าไป เป็นอาหาร โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ส่วนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นก็จะแยกออกจากมวลจุลชีพและน้ำเสียทางทอนบนของถัง โดยอุปกรณ์แยกก๊าซ (Gas - Solids - Separator) ซึ่งความยุ่งยากของระบบนี้อยู่ที่การสร้างชั้นตะกอนที่มีจุลชีพในลักษณะที่เป็นเม็ดกล่ำว่ากันในปัจจุบันสามารถเลี้ยงชั้นของตะกอนที่ดีได้ภายใน 6 สัปดาห์ และสามารถเก็บรักษาโดยไม่จำเป็นต้องมีการเลี้ยงได้นานนับปี ระบบนี้มีลักษณะดังภาพที่ 2.3



ศูนย์วิทยทรัพยากร
ภาพที่ 2.2 ถังกรองไร้อากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.3 ระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 จุลชีวะและชีวเคมีของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก มีปฏิกิริยาชีวเคมี และสารอินเตอร์มีเดียที่เกิดขึ้นมากมาย โดยปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจะ เปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็น ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ซึ่งอาจจำแนกขั้นตอนของการย่อยสลายออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

2.4.1 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด (Acid Formation หรือ Non - Methanogenic Phase)

2.4.2 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane Formation หรือ Methanogenic Phase)

โดยในการย่อยสลายทั้งสองขั้นตอนนี้อาจจำแนกแบคทีเรียที่สำคัญได้เป็น

4 ประเภทด้วยกันคือ

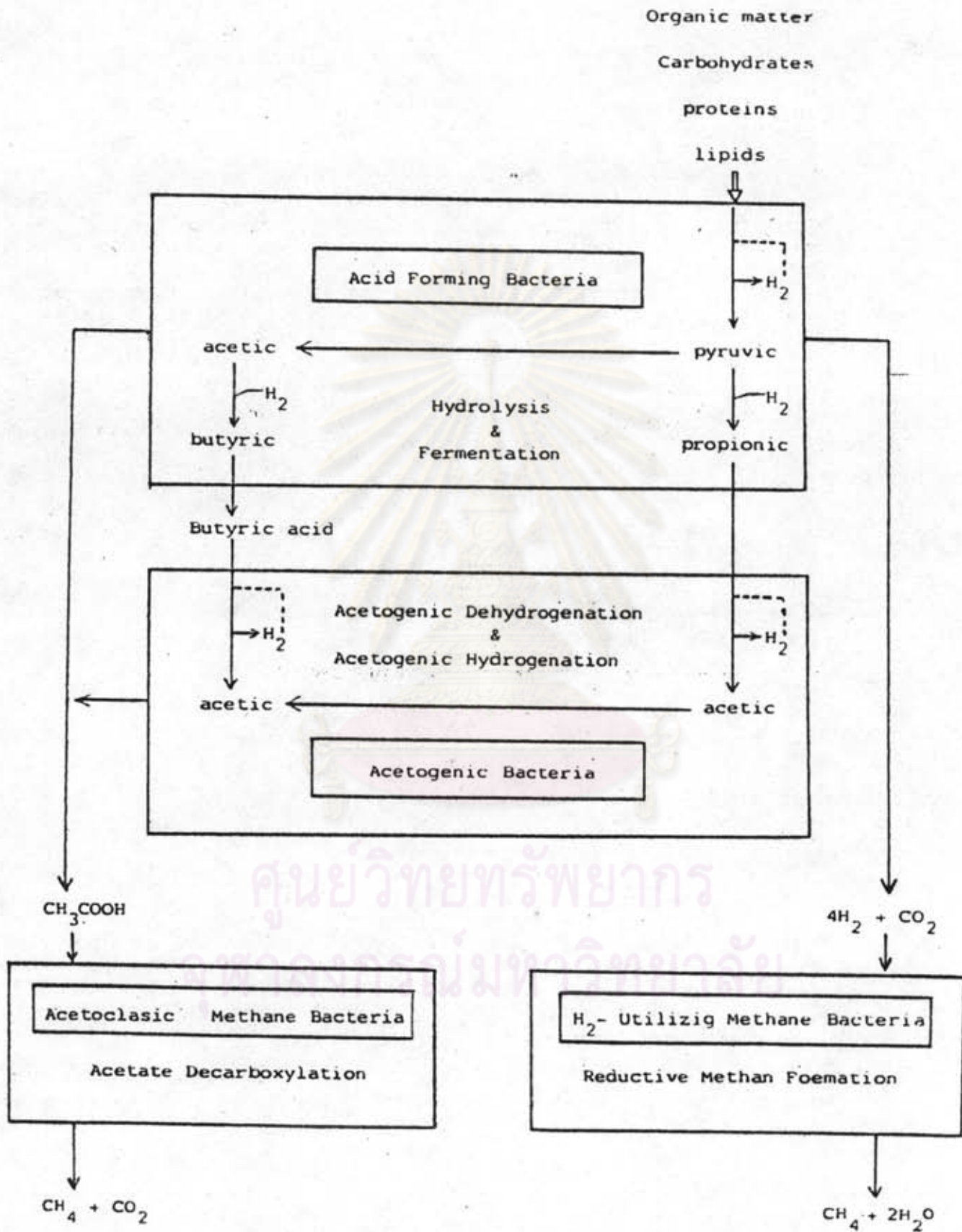
1. Acid Forming Bacteria
2. Acetogenic Bacteria
3. Acetoclastic Methane Bacteria
4. H₂ - Utilizing Methane Bacteria

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.4

2.4.1 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด

ในขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดนั้น จะเป็นขั้นตอนที่สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ถูกย่อยสลายให้เป็นกรดอินทรีย์ (Organic acids) ที่มีโมเลกุลเล็กลง และยังมีไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่น ๆ ซึ่งสารเหล่านี้จะถูกใช้เป็นซับสเตรท (Substrate) ของแบคทีเรียในขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนต่อไป สำหรับในขั้นตอนของการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดนี้จะประกอบไปด้วยกลุ่มแบคทีเรียหลายประเภทแต่ที่สำคัญมี 2 ประเภทคือ

1. Acid Forming Bacteria
2. Acetogenic Bacteria



ภาพที่ 2.4 ขบวนการเมทาไลซึมของขบวนการหมอมสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (10)

นอกจากแบคทีเรียทั้งสองประเภทนี้ ยังพบทั้งแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Obligate Anaerobic Bacteria) และแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตในภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนได้ (Facultative Anaerobic Bacteria) โดยที่จะพบแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนมากกว่า (1, 2, 3, 4) ตารางที่ 2.1 จะแสดงถึง แบคทีเรียบางส่วนที่พบในขั้นตอนของการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดในแหล่งอาหารประเภทต่าง ๆ

ในขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดนั้นอาจแบ่งตามกลไกของการย่อยสลายได้เป็น 2 กลไก คือ

1. การย่อยสลายภายนอกเซลล์

การย่อยสลายภายนอกเซลล์จะเกิดขึ้นโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) คือแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องจะปล่อยเอนไซม์ออกนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ เพื่อไปลดขนาดของสารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลเล็กลงพอที่จะสามารถดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ได้ การย่อยสลายภายนอกเซลล์โดยทั่วไปสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายให้เป็นกรดอะมิโน , กลูโคสและกลีเซอรอล ตามลำดับ

2. การย่อยสลายภายในเซลล์

สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็ก ๆ จะถูกดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์แล้วย่อยสลายได้กรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลต่ำ โดยมีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว เรียกว่า กรดไวลไทล์ (Volatile Acids) แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอื่น ๆ อีกเล็กน้อย พร้อมทั้งมีการสร้างเซลล์ใหม่ด้วย

การย่อยสลาย กรดอะมิโน กลูโคส และ กลีเซอรอลของแบคทีเรีย ส่วนใหญ่จะได้กรดไพรูวิก (Pyruvic Acid) ก่อนเสมอ แล้วกรดไพรูวิก จึงถูกย่อยสลายต่อไปเป็นกรดอะซิติก (Acetic Acid) และกรดอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำนั้นเป็นแอลกอฮอล์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (5)

Bacterium	Isolated on		Protein		
	Cellulose	Starch	Peptone	Casein	Lipid
<i>Aerobacter aerogenes</i>					
<i>Alcaligenes bookerii</i>					X
<i>A. faecalis</i>	X				
<i>Bacillus</i> sp					
<i>B. cereus</i> var. <i>mycoides</i>		X		X	
<i>B. cereus</i>	X	X	X	X	
<i>B. circulans</i>			X		
<i>B. firmus</i>			X		
<i>B. knaufelhampl</i>					
<i>B. megaterium</i>	X	X		X	X
<i>B. pumilus</i>			X	X	
<i>B. sphaericus</i>			X	X	X
<i>B. subtilis</i>			X	X	X
<i>Clostridium carnofoetidum</i>	X				
<i>Escherichia coli</i>			X	X	
<i>E. intermedia</i>					
<i>Micrococcus candidus</i>		X			
<i>M. luteus</i>					X
<i>M. varians</i>		X	X	X	
<i>M. ureae</i>		X			
<i>Paracolobacterium intermedium</i>			X		
<i>P. coliforme</i>			X		
<i>Proteus vulgaris</i>	X				
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	X				
<i>P. ambigua</i>					
<i>P. olrovorans</i>					X
<i>P. perolens</i>					X
<i>P. pseudomallei</i>					
<i>P. reptilivora</i>	X				
<i>P. riboflavina</i>	X				X
<i>P. spp.</i>	X	X	X	X	X
<i>Sarcina cooksonii</i>					
<i>Streptomyces bikiniensis</i>					X

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 ตารางที่ 2.1 แบคทีเรียบางตัวที่พบในขั้นตอนการย่อยละลายที่ทำให้เกิด
 กรดในแหล่งอาหารประเภทต่าง ๆ (46)

การย่อยสลายในขั้นตอนนี้มีวิถึทาง ของการย่อยสลายที่ อาจเกิดขึ้นได้หลายวิถึทางซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่จะย่อยสลาย และ เอ็นไซม์ที่มีอยู่ในระบบตัวอย่าง เช่น

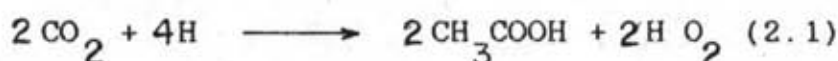
สารประเภทกลูโคสจะถูกย่อยสลายโดยปฏิกิริยา ไกลโคไลซิส (glycolysis) เช่น การย่อยสลายกลูโคสตามวิถึทาง Embden - Meyerhof - Parnas ซึ่งแสดงในภาพที่ (2.5)

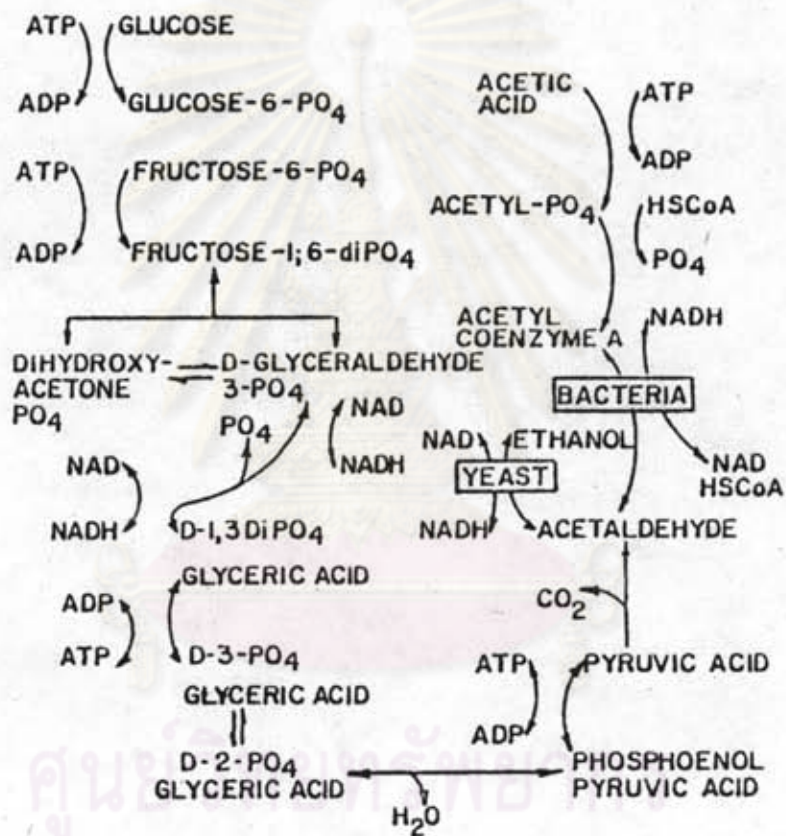
สารประเภทไขมัน เช่น กลีเซอรอลจะถูกย่อยสลาย โดยปฏิกิริยาฟอสฟอไรเรชั่น (phosphorylation) และกรดไขมันขนาดใหญ่ (long chain fatty acid) จะถูกย่อยสลายโดยปฏิกิริยา เบต้าออกซิเดชั่น (β - oxidation) ซึ่งแสดงในภาพที่ (2.6)

สารประเภทกรดอะมิโน จะถูกย่อยสลายโดยปฏิกิริยา ดีอะมีเนชัน (Deamination) เช่น การย่อยสลายกรดกลูตามิก (glutamic acid) ซึ่งแสดงในภาพที่ (2.7)

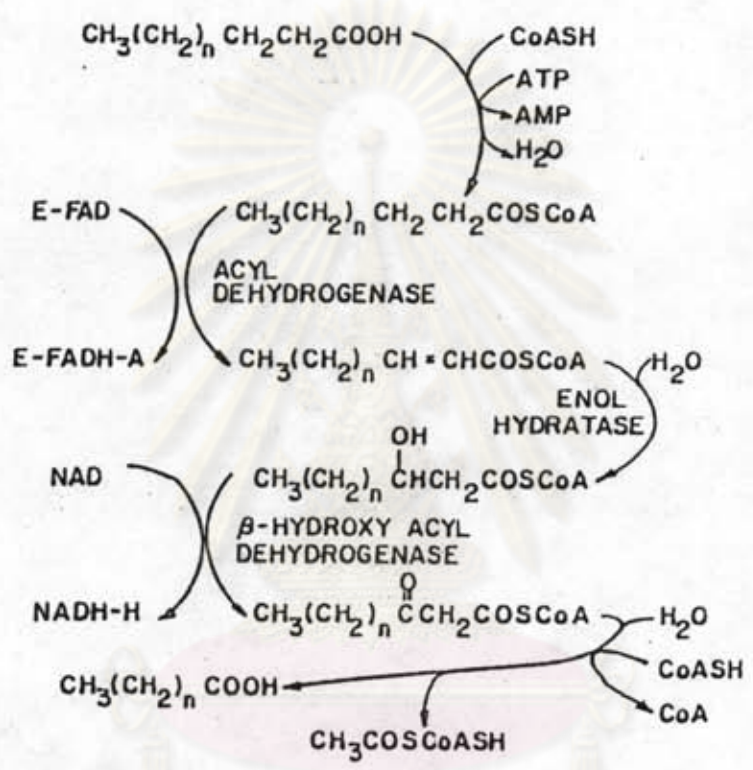
การย่อยสลายในขั้นตอนนี้การสร้างกรดนี้ นอกจาก กรดอะซิติกจะถูกสร้างขึ้น โดยการย่อยสลายของสารอินทรีย์แล้วยังพบว่า กรดอะซิติกบางส่วนยังเกิดขึ้นจากการรวมตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ กับไฮโดรเจน โดยอาศัยแบคทีเรียที่ชื่อว่า *Clostridium aceticum* ดังสมการที่ 2.1 (6)

ขั้นตอนนี้การย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดนี้จะมีการลดภาวะ อินทรีย์ของน้ำเสียอย่างมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีการลดลง เลขเมื่อไม่มีการ เกิด ไฮโดรเจน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะอิเล็กตรอนที่อยู่ในซับสเตรท (Substrate) เดิมจะถูกส่งต่อไปให้สารอินทรีย์ที่ยังคงอยู่ในน้ำเสียส่วนของ ซับสเตรทที่ลดลงไปบ้างนั้น เป็นผลมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของแบคทีเรียใน ระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารอินทรีย์เท่านั้น แต่เมื่อมีการสร้าง ไฮโดรเจน อิเล็กตรอนจะถูกส่งไปให้ไฮโดรเจนอ็อกไซด์แล้วกลายเป็นก๊าซหนี้ออก จากระบบ จึงจะเป็นการลดภาวะอินทรีย์



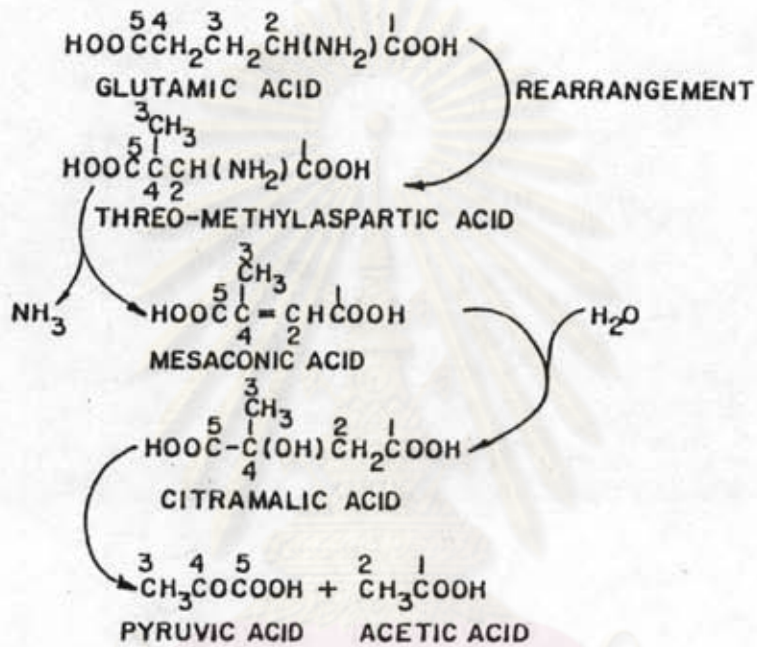


ภาพที่ 2.5 การย่อยสลายกลูโคสโดยผ่านขบวนการไกลโคไลซิส (15)



ภาพที่ 2.6 การย่อยละลายไขมันโดยผ่านกระบวนการเบต้าออกซิเดชัน (50)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.7 การย่อยสลายกรดกลูตามิค (49)

ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน

แบคทีเรียที่มีความสำคัญมากในการสร้างก๊าซมีเทนขึ้นอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากอะซิเตต (Acetoclastic Methane Bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (H_2 - Utilizing Methane Bacteria)

โดยแบคทีเรียเหล่านี้ จะใช้ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนของการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด เช่น กรดโวลลาไล์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และอื่น ๆ ไปใช้เป็นสารอาหาร และพลังงาน แล้วก่อให้เกิดก๊าซมีเทน ซึ่งถือว่าเป็นการสิ้นสุดของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบบไร้อากาศ

เนื่องจากพฤติกรรมของแบคทีเรียที่อยู่ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรมากมายหลายประการ ดังนั้นผลของการศึกษา วิจัยต่าง ๆ ในอดีตที่ผ่านมา จวบจนปัจจุบันนี้ก็สามารถอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเพียงที่สภาวะหนึ่ง ๆ เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามก็ทำให้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของแบคทีเรียได้อย่างมีหลักการมากขึ้น ซึ่งการศึกษา และงานวิจัยสำคัญ ๆ ที่ควรกล่าวถึงพอเป็นสังเขปมีดังนี้

Balch และคณะ (7) ได้แสดงชนิดของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนที่เป็นเชื้อบริสุทธิ์ไว้ดังตารางที่ 2.2

Buswell และ Neave (8) ได้กล่าวถึงความสำคัญของการย่อยสลายแบบ 2 ขั้นตอน และยังได้อ้างถึง Thum และ Reichle (ในปี ค.ศ. 1914) ซึ่งเป็นผู้พบว่าการเกิดกรดในขั้นตอนแรก และเกิดค่างในขั้นตอนหลัง โดยจะเกิดกรดโวลลาไล์ในระหว่างขั้นตอนทั้งสอง

Omelianski (9) ได้ศึกษาการเกิดก๊าซมีเทนจาก Cellulose แล้วสรุปได้ดังสมการที่ 2.2

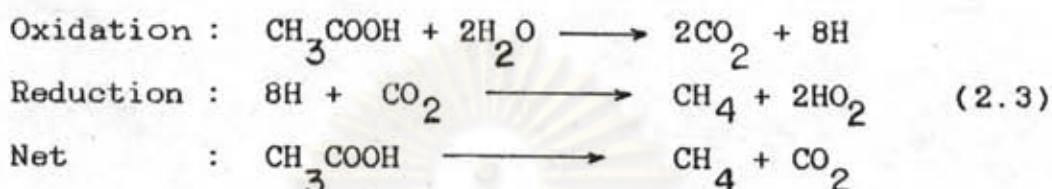


Type strain	Former designation	Substrates for growth and CH ₄ production
Order I. <i>Methanobacteriales</i> (type order)		
Family I. <i>Methanobacteriaceae</i>		
Genus I. <i>Methanobacterium</i> (type genus)		
1. <i>Methanobacterium formicicum</i> (neotype species)	<i>Methanobacterium formicicum</i>	H ₂ , formate
2. <i>Methanobacterium bryantii</i>	<i>Methanobacterium</i> sp. strain M.o.H.	H ₂
3. <i>Methanobacterium bryantii</i> strain M.o.H.G.	<i>Methanobacterium</i> sp. strain M.o.H.G.	H ₂
Genus II. <i>Methanobrevibacter</i>		
1. <i>Methanobrevibacter ruminantium</i> (type species)	<i>Methanobacterium ruminantium</i> strain MI	H ₂ , formate
2. <i>Methanobrevibacter arborophilus</i>	<i>Methanobacterium arborophilum</i>	H ₂
3. <i>Methanobrevibacter arborophilus</i> strain AZ	<i>Methanobacterium</i> sp. strain AZ	H ₂
4. <i>Methanobrevibacter arborophilus</i> strain DC	<i>Methanobacterium</i> strain DC	H ₂
5. <i>Methanobrevibacter smithii</i>	<i>Methanobacterium ruminantium</i> strain PS	H ₂ , formate
Order II. <i>Methanococcales</i>		
Family I. <i>Methanococcaceae</i>		
Genus I. <i>Methanococcus</i>		
1. <i>Methanococcus vannielii</i> (neotype species)	<i>Methanococcus vannielii</i>	H ₂ , formate
2. <i>Methanococcus solis</i>	<i>Methanococcus</i> sp. strain PS	H ₂ , formate
Order III. <i>Methanomicrobiales</i>		
Family I. <i>Methanomicrobaceae</i> (type family)		
Genus I. <i>Methanomicrobium</i> (type genus)		
1. <i>Methanomicrobium mobile</i> (type species)	<i>Methanobacterium mobile</i>	H ₂ , formate
Genus II. <i>Methanogenium</i>		
1. <i>Methanogenium cariaci</i> (type species)	Caviso isolate JRI	H ₂ , formate
2. <i>Methanogenium mortuigr</i>	Black Sea isolate JRI	H ₂ , formate
Genus III. <i>Methanospirillum</i>		
1. <i>Methanospirillum hungatii</i>	<i>Methanospirillum hungatii</i>	H ₂ , formate
Family II. <i>Methanosarcinaceae</i>		
Genus I. <i>Methanosarcina</i> (type genus)		
1. <i>Methanosarcina barkeri</i> (type species)	<i>Methanosarcina barkeri</i>	H ₂ , CH ₃ OH, CH ₃ NH ₂ , acetate
2. <i>Methanosarcina barkeri</i> strain 227	<i>Methanosarcina barkeri</i> strain 227	H ₂ , CH ₃ OH, CH ₃ NH ₂ , acetate
3. <i>Methanosarcina barkeri</i> strain W	<i>Methanosarcina barkeri</i> strain W	H ₂ , CH ₃ OH, CH ₃ NH ₂ , acetate

ตารางที่ 2.2 ชนิดของแบคทีเรียที่สังเคราะห์แก๊สเป็นเชื้อโรค (7)

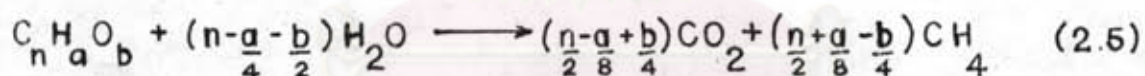
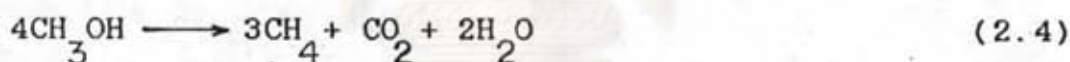
Van Niel ในปี ค.ศ. 1934 กล่าวว่าอะซิเตทออกซิเดชัน

(acetate oxidation) จะทำให้เกิดการลดอะตอมของไฮโดรเจนและมีเทน ทั้งนี้เนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.3



Stadaman และ Barker (11) ได้แสดงว่ากรดเมทานอล (methanal acid) สามารถสลายตัวได้มีเทน ดังสมการที่ 2.4

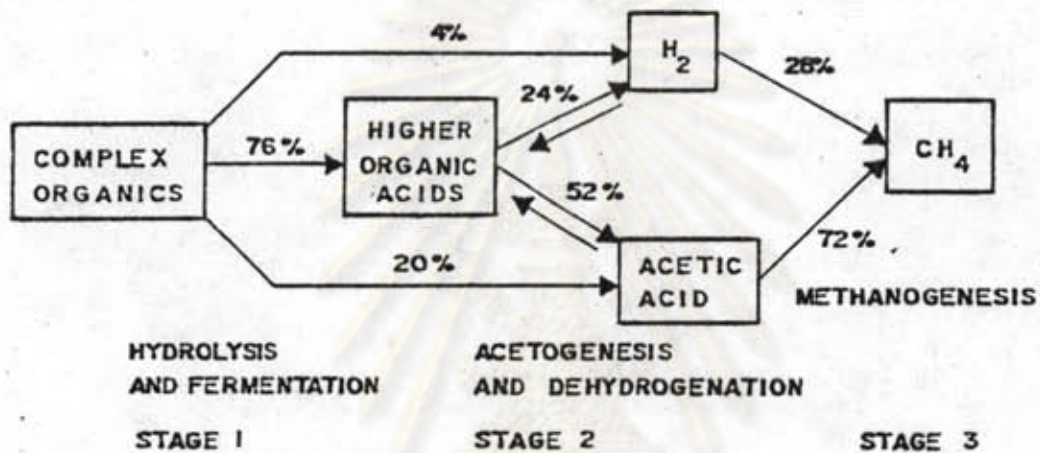
A.M. Buswell ในปี 1952 (8) ได้เสนอสมการการย่อยสลายแบบไร้อากาศทั่วไปดังสมการที่ 2.5



McCarty ในปี 1981 (12) ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระดังภาพที่ (2.8)

Kaplovsky (4) ได้กล่าวถึงกรดโวลลาไคล์ที่สำคัญในการนำไปใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการผลิตมีเทนมี 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก และกรดบิวทิริก

Zeikus ในปี 1980 (13, 14) ได้แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนสามารถใช้สารอาหารโดยตรงน้อยกว่าที่เคยสรุปในอดีตมากคือสามารถใช้ CO , methanol, formate, $\text{CH}_3\text{N}_2\text{H}$ และ acetic เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงานได้

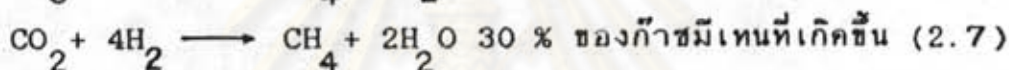
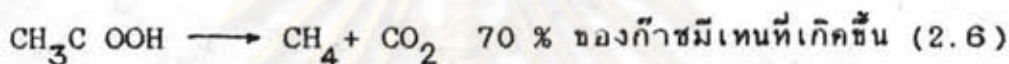


ภาพที่ 2. 8 การเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ ในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ของ ซี ไอ ดี (12)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการชีวเคมีและพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยาในการสร้างมีเทนของแบคทีเรียชนิดที่สร้างมีเทนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และ การใช้สเตรทของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนชนิดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนนั้นจะเป็นแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน (Obligate Anaerobic bacteria) และยังสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชที่แคบ ๆ และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนั้น 70 % ของก๊าซมีเทนได้มาจากกระบวนการ Acetate decarboxylation ส่วน 30 % ของก๊าซมีเทนที่เหลือได้มาจากกระบวนการ Reduction methane Formation ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7



2.5 สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

จากการศึกษาและวิจัยนั้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันทำให้ทราบว่าสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ภายในระบบบำบัดนั้นก็มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ซึ่งสามารถกล่าวแยกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

2.5.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อชนิดและการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และยังมีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทน ดังแสดงในภาพที่ (2.9)

จุลชีพบางชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน และความสามารถผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนบางชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาพที่ (2.10)

ในปี ค.ศ. 1974 Pfeffer และ Liebman (17) ได้กล่าวไว้ว่าประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 63 °C และสรุปเช่นเดียวกับ Garber และคณะว่า การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศไม่ได้ช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นเพียงแต่ช่วยลดเวลาการบำบัดลงเท่านั้น

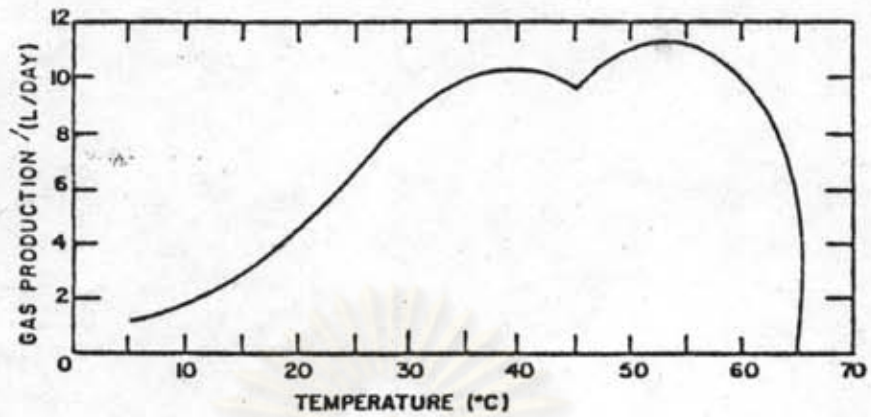
Reaction	G at pH 7 (k.J./CH)
$4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 \text{ ----> CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	-139.2
$4 \text{ HCOO}^- + 2 \text{ H}^+ \text{ ----> CH}_4 + 2 \text{ CO}_2 + 2 \text{ HCO}_3^-$	-126.8
$\text{HCOO}^- + 3 \text{ H}_2 + \text{ H}^+ \text{ ----> CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	-134.3
$4 \text{ CO} + 2 \text{ H}_2\text{O} \text{ ----> CH}_4 + 3 \text{ CO}_2$	-185.1
$4 \text{ CH}_3\text{OH} \text{ ----> 3CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	-102.5
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \text{ ----> CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-121.1
$4 \text{ CH}_3\text{NH}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ H}^+ \text{ ----> 3CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{ NH}_4^+$	-101.6
$2 (\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ H}^+ \text{ ----> 3CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{ NH}_4^+$	- 86.3
$4 (\text{CH}_3)_2\text{N} + 6 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ H}^+ \text{ ----> 9CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4 \text{ NH}_4^+$	- 80.2
$2 \text{ CH}_3\text{CH}_2\text{-N(CH}_3)_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \text{ ----> 3CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{ CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$	- 70
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \text{ ----> CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	- 28.2

ตารางที่ 2.3 สมการชีวเคมีและพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยาในการสร้างมีเทนของแบคทีเรีย
ที่สร้างมีเทน (43)

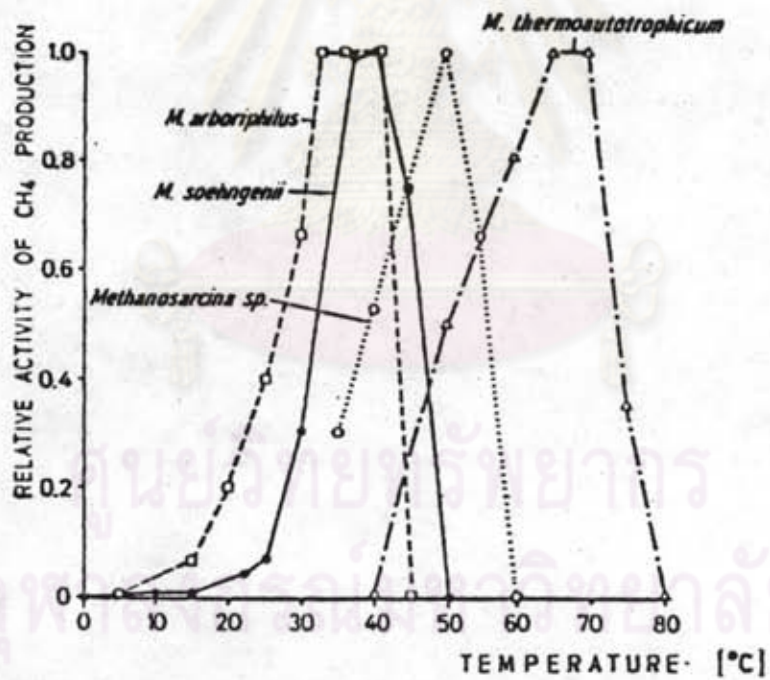
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Substrate	Organism
H ₂	<i>Methanobacterium bryantii</i> , <i>M. formicicum</i> , <i>M. thermoautotrophicum</i> <i>Methanobrevibacter arborophilus</i> , <i>M. ruminantium</i> , <i>M. smithii</i> <i>Methanococcus mazei</i> , <i>M. vannielii</i> , <i>M. voltae</i> <i>Methanomicrobium mobile</i> <i>Methanogenium cariaui</i> , <i>M. marinigræ</i> <i>Methanospirillum hungatei</i> <i>Methanosarcina barkeri</i>
HCOOH	<i>M. formicicum</i> , <i>M. ruminantium</i> , <i>M. smithii</i> , <i>M. vannielii</i> , <i>M. voltae</i> <i>M. mobile</i> , <i>M. cariaci</i> , <i>M. marinigræ</i> , <i>M. hungatei</i>
CO	<i>M. barkeri</i>
CH ₃ OH	<i>M. mazei</i> , <i>M. barkeri</i>
CH ₃ NH ₂ , (CH ₃) ₂ NH, (CH ₃) ₃ N	<i>M. mazei</i> , <i>M. barkeri</i>
CH ₃ CH ₂ -H(CH ₃) ₂	<i>M. barkeri</i>
CH ₃ COOH	<i>M. mazei</i> , <i>M. barkeri</i> , <i>Methanothrix goehringii</i>

ตารางที่ 2.4 การใช้ขั้วนำแคโทดของแบคทีเรียที่สังเคราะห์มีเทนชนิดต่าง ๆ (47)



ภาพที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (46)



ภาพที่ 2.10 ความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน
บางชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ (47)

โดยทั่วไปอุณหภูมิของระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่เหมาะสมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงมีโซฟิลลิก (mesophilic) $30 - 40^{\circ}\text{C}$ และช่วงเทอร์โมฟิลลิก (thermophilic) $45 - 55^{\circ}\text{C}$ โดยมีความแปรปรวนที่ยอมรับได้สำหรับช่วงมีโซฟิลลิกคือ $+ 2.8^{\circ}\text{C}$ และช่วงเทอร์โมฟิลลิกคือ $+0.8^{\circ}\text{C}$ ที่ 49°C และ $+0.3^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 52°C (18)

2.5.2 ค่าพีเอช , กรดโวลลาไทล์ , และสภาพความเป็นด่าง

ค่าพีเอชในระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนนั้นอ่อนไหวต่ออนุภาคไฮดรอกไซด์หรือพีเอชค่อนข้างมาก ดังนั้นถ้าต้องการให้การย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และจากรายงานการวิจัยได้สรุปว่า พีเอชที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง $6.9 - 7.2$ (19), $6.4 - 7.2$ (20) และ $6.6 - 7.6$ (21) ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังกรองไร้อากาศที่พีเอชต่าง ๆ กันนั้นแสดงดังภาพที่ (2.11) และความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียบางชนิดที่ ค่าพีเอชต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาพที่ (2.12)

สาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าพีเอชในระบบเปลี่ยนแปลงไปก็คือ พีเอชของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบและการสร้างกรดโวลลาไทล์ในชั้นคอนของ Acid Formation

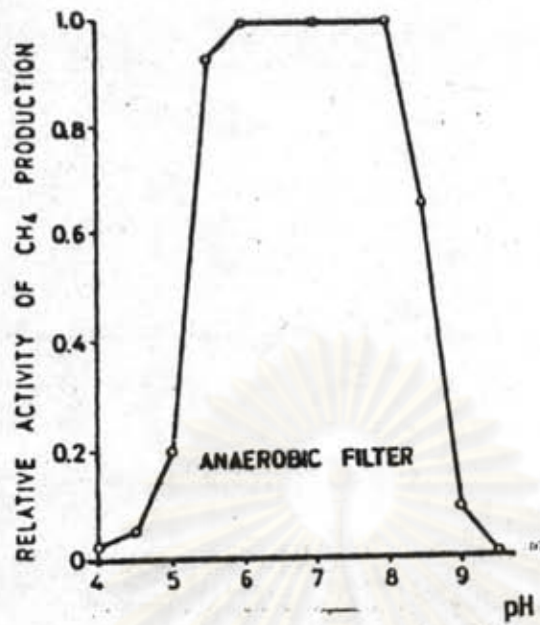
ในปี ค.ศ. 1969 Pohland (22) ได้เสนอวิธีในการควบคุมพีเอชโดยอาศัยความเป็นด่าง เรียกว่า "Acid Base Equilibrium Control" ดังสมการที่ 2.8

$$\text{BA} = \text{TA} - 0.833 (0.85) \text{ TVA} \quad (2.8)$$

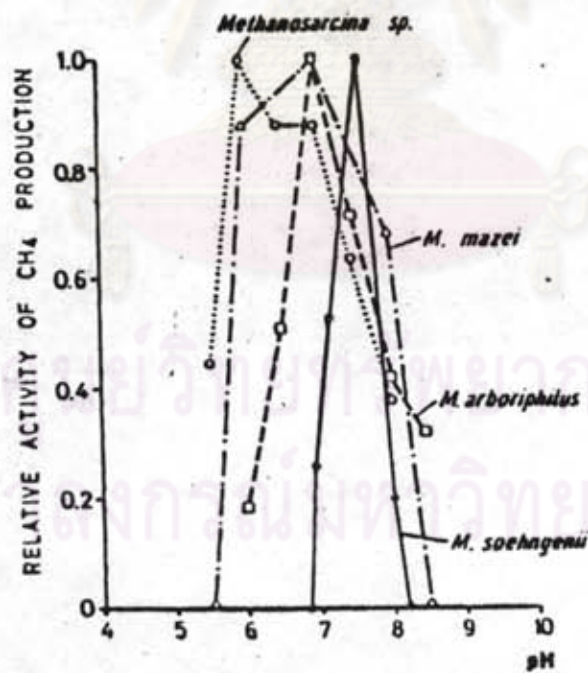
โดยที่

BA = ปริมาณความเป็นด่างไบคาร์บอเนตที่มากเกินพอหรือซากไบ (มก./ล ของ CaCO_3)

TA = ปริมาณความเป็นด่างรวมวัดโดยการติเตรตถึงพีเอช 4.0 (มก./ล ของ CaCO_3)



ภาพที่ 2.1 การผลิตก๊าซมีเทนที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (47)



ภาพที่ 2.12 ความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียบางชนิดที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (47)

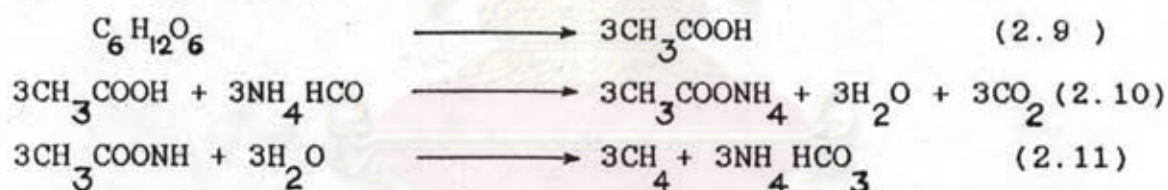
TVA = ปริมาณของกรดไคลาไคล์รวมที่มีอยู่
(มก./ล ของ CH_3COOH)

0.833 = น้ำหนักสมมูลของ CaCO_3 / น้ำหนักสมมูลของ CH_3COOH

0.85 = มีอะซิติก 85 % จากกรดไคลาไคล์ เมื่อใช้วิธีวิเคราะห์จนถึง พีเอช 4.0

Kirsch และ Sykes (23) ได้แนะนำในการปรับพีเอชควรใช้ NaHCO_3 มากกว่า NaOH หรือปูนขาว

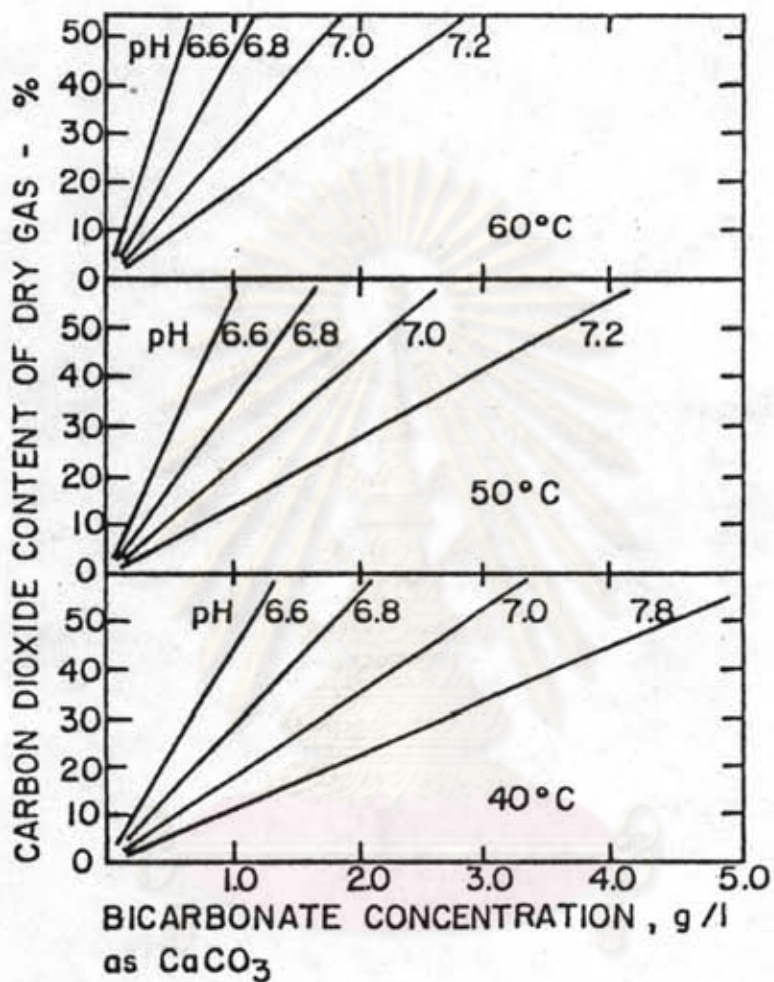
วิธีการควบคุมพีเอชโดยอาศัยค่านี้ก็คือ การเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ (buffer) ให้กับระบบในรูปของค่านี้เอง แต่โดยปกติแล้วในน้ำเสียก็มักจะมีปริมาณบัฟเฟอร์อยู่แล้ว และเมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนก็จะเกิดค่าขึ้น ซึ่งก็เป็นการเพิ่มปริมาณบัฟเฟอร์ให้กับระบบอีกทางหนึ่ง กลไกการละลายและการเกิดบัฟเฟอร์ในระบบสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.9 - 2.11



เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบก็มีความสัมพันธ์กับพีเอช เช่นกัน ดังที่ Bonta และ Pomeroy (24) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ ดังสมการที่ 2.12

$$\text{pH} = 5.14 - \log (\% \text{CO}_2) + \log (\text{HCO}_3 \text{ as mg/l CaCO}_3) \quad (2.12)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างไบคาร์บอเนตกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่พีเอช และอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ได้แสดงไว้ในภาพที่ (2.13)



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างไบคาร์บอเนตกับคาร์บอนไดออกไซด์
ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างกัน (46)

ในปีค.ศ. 1969 WPCF ได้ยอมรับการใช้อัตราส่วนของกรด ไวลาไคล์กับสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) มาเป็นตัวควบคุมกระบวนการบำบัด แบบไร้อากาศโดยสรุปไว้ว่า

VFA/Alk. < 0.3 - 0.4 ระบบดี

VFA/Alk. > 0.8 ระบบล้มเหลว

โดยวัด VFA ในรูปของ CH_3COOH และ Alk. วัดในรูปของ CaCO_3

2.5.3 สารอาหาร (Nutrients)

เนื่องจากในเซลล์ของจุลชีพจะประกอบไปด้วยธาตุหลักที่สำคัญ 4 ชนิดคือ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ โดยมีอัตราส่วน C:N:P:S เท่ากับ 100:10:1:1: (25) ดังนั้นในการดำรงชีวิตของจุลชีพ จึงจำเป็นต้องใช้ธาตุเหล่านี้ ไปเป็นสารอาหาร Speece และ McCarty (26) ได้แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระนั้นต้องการธาตุไนโตรเจน เมื่อเทียบกับน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (Cell Weight/N = 9.4) Sanders และ Bloodgood (27) พบว่าจุลชีพชนิดไม่ต้องการออกซิเจนอิสระต้องการฟอสฟอรัส เท่ากับ 1 ใน 7 ของปริมาณไนโตรเจนที่ ประกอบเป็น เซลล์ (N/P = 7) และ McCarty (26) กล่าวว่าปริมาณธาตุไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสที่จุลชีพต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างน้อยที่สุดควรมีอัตราส่วน ของ BOD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 นอกจากสารอาหารหลักแล้ว แบคทีเรีย ยังต้องการอาหารเสริมอีกในปริมาณเล็กน้อย เชื่อว่าแบคทีเรียใช้สารอาหารเหล่านี้ใน กลไกของเมตาบอลิซึม ปริมาณอาหารเสริมที่ควรมีในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้แนะนำไว้ในตารางที่ 2.5 (28)

2.5.4 สารพิษ (Toxic Materials)

McCarty (29) พบว่าความเป็นพิษต่อระบบของสารพิษนั้นมี ตั้งแต่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์จนถึงฆ่าจุลินทรีย์ (Toxic) โดยความเป็นพิษ นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารและปริมาณของสารนั้น ๆ

สารอาหาร	ความเข้มข้น (มก./ล)
โซเดียม	125 - 250
โพแทสเซียม	200 - 400
แคลเซียม	100 - 200
แมกนีเซียม	75 - 125
แอมโมเนีย	80 - 170
เหล็ก	1 - 10
โบนอลท์	1 - 5
ไทอะมีน	1 - 5
กรดเพนโทเทนิค (Pantothenic acid)	1 - 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ปริมาณอาหารเสริมที่แบคทีเรียต้องการ (28)

สารบางชนิดเมื่ออยู่ในระบบในปริมาณที่พอเหมาะสามารถกระตุ้น การทำงานของแบคทีเรีย และจะแสดงความเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นจนถึงจุดหนึ่ง และความเป็นพิษของสารบางชนิดอาจมีความรุนแรง เพิ่มขึ้นหรือลดลง ได้ เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลง พีเอช และอุณหภูมิเกิดขึ้น (30)

สารที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบบำบัดแบบไร้อากาศอาจแบ่ง ได้ เป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. พิษของกรดไวลาไธล์ (Volatile acid toxicity)

กรดไวลาไธล์จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดที่สร้างมีเทนเพราะ จะทำให้พีเอชในระบบลดลง Kotze และคณะ (31) ได้กล่าวว่าโมเลกุลของ กรดอ่อน (weak acid) และด่างอ่อน (weak base) ที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน (ionic form) สามารถผ่านเข้าไปภายในเซลล์ของจุลชีพได้เร็วมาก ทำให้ เซลล์เสียสมดุลย์ของการขนส่งและการขับถ่าย และตายลงในที่สุด ตัวอย่าง เช่นที่ พีเอชต่ำ กรดอ่อนซึ่งไม่แตกตัวเป็นไอออนจะซึมผ่านเข้าสู่เซลล์ของจุลชีพได้ง่ายหา ้ให้จุลชีพตายลง และที่พีเอชสูงด่างอ่อนที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนก็จะให้ผลเช่นเดียวกัน

2. พิษของไอออนหรือโลหะหนัก (Ion or Heavy Metal Toxicity)

ไอออนที่สำคัญได้แก่ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ S^{2-} McCarty และ McKinney (32) กล่าวว่าไอออนที่มีวาเลนซี 2 จะมีพิษ มากกว่า ไอออนที่มีวาเลนซี 1 ถึง 10 เท่า การควบคุมความเป็นพิษของ ไอออนบวกสามารถทำได้โดยวิธีแอนทาโกนิซึม (Antagonism) คือเมื่อไอออนบวก อยู่ร่วมกันในความเข้มข้นที่พอเหมาะ ความเป็นพิษของไอออนบวกชนิดหนึ่งสามารถ ลดความเป็นพิษของไอออนบวกอีกชนิดหนึ่งได้ เช่น พิษของ Na^+ เข้มข้น 3500 มก./ล สามารถทำให้ลดลงได้ถ้ามี Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50 - 1000 มก./ล (32) แต่ในบางกรณีไอออนบวกชนิดหนึ่งก็สามารถเพิ่มความ เป็นพิษให้กับไอออนบวกอีกชนิดหนึ่งได้ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าซินเนอร์จิสซึม (Synergism) ซึ่งแอนทาโกนิซึมและซินเนอร์จิสซึมของไอออนบวกใน กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แอนทาโกนิสซึม และซินเนอร์จิสซึมของไอออนบวก
ในกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในอากาศ (28)

Cation	Antagonist	Synergist	Concentration of Secondary Cation at which Antagonism Ends or Synergism Begins (mg/liter)
Na	K		4,000-5,000
Na		NH ₄	200-400
Na		Ca	400-2,000
Na		Mg	250-1,250
NH ₄	Na		1,000-2,000
NH ₄		K	1,000
NH ₄		Ca	400-800
NH ₄		Mg	120-250
K	Na		2,000-2,500
K	Ca		2,000-4,000
K	Mg		1,700-2,000
K	NH ₄		1,700
Mg	Na		2,000-2,500
Mg	K		4,000-5,000
Mg		NH ₄	100-200
Mg		Ca	200
Ca	Na		1,000-1,200
Ca	K		4,000-5,000
Ca		NH ₄	700-900
Ca		Mg	100-250

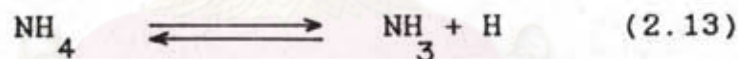
โลหะหนักที่สำคัญ ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิเกิลโคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โดยโลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปของ อีออน และความเป็นพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ปริมาณไฮโดรเจน ซัลไฟด์ (H_2S) ในน้ำทิ้ง เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักกลายเป็นเกลือของโลหะซึ่งไม่ละลายน้ำ (29) ดังภาพที่ 2.14

ความเป็นพิษของอีออนหรือโลหะหนักจะ เกิดคั่งจลชีพีก็ต่อเมื่อ มีปริมาณที่มากกว่าค่าระดับหนึ่งดังแสดงใน ตารางที่ 2.7

3. พิษของก๊าซบางชนิด

พิษของแอมโมเนีย (Ammonia Toxicity)

ในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจน รวมอยู่ด้วย เช่น โบรคิน หรือ ยูเรีย (urea) จะเกิดแอมโมเนียขึ้นในรูปของ แอมโมเนียมอีออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งสารทั้งสองตัวนี้จะ เปลี่ยนไปมาได้ โดยขึ้นอยู่กับพีเอช ดังสมการที่ 2.13



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้ายแต่ถ้า พีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ซึ่ง NH_3 จะยับยั้งการทำงาน ของแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนได้มากกว่า NH_4^+ (29) และผลของแอมโมเนีย ต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้แสดงในตารางที่ 2.8 ตารางที่ 2.8 (29)

แอมโมเนียในโครเจน (มก/ล)	ผลต่อระบบ ฯ
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 - 1000	ยังไม่เกิดผล
1500 - 3000	เริ่มยับยั้ง เมื่อพีเอชสูง
> 3000	เป็นพิษโดยตรง

SULFIDES	
SOLUBLE HEAVY METALS COPPER NICKEL ZINC	INSOLUBLE HEAVY METALS SULFIDES
TOXIC	NON-TOXIC
QUANTITY OF SULFIDE SALTS REQUIRED FOR PRECIPITATION	CONCENTRATION OF HEAVY METALS PRECIPITATION
<u>SULFIDE SALTS ADDED</u>	<u>CONCENTRATION OF HEAVY METALS PRECIPITATION</u>
1 mg/l SULFIDE(S ²⁻)	1.80-2.00 mg/l
1 mg/l SODIUM SULFIDE(Na ₂ S)	0.75-0.84 mg/l
1 mg/l SODIUM SULFIDE(Na ₂ S·9H ₂ O)	0.24-0.27 mg/l

ภาพที่ 2. 14 ปฏิกริยาทำลายพิษของโลหะหนักโดยซัลไฟด์ในสถานะไร้ออกซิเจน (29)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไอออนและโลหะหนักที่เป็นพิษ	ความเข้มข้น		ผลกระทบต่อระบบ
	ไมก./ลบ.คม.	มก./ลบ.คม.	
Na ⁺	0.2	4,800	เริ่มการยับยั้งการทำงาน (inhibition)
	0.4	9,200	หยุดการทำงาน (complete inhibition)
K ⁺	0.05-0.10	1,900-3,900	ไม่ผล (no inhibition)
	> 0.1	> 3,900	เริ่มการยับยั้งการทำงาน
Mg ²⁺	0.35	13,850	หยุดการทำงาน
	> 0.05	1,200	เริ่มการยับยั้งการทำงาน
Ca ²⁺	0.2	4,800	หยุดการทำงาน
	0.075	3,000	เริ่มการยับยั้งการทำงาน
S ²⁻	> 0.2	> 8,000	หยุดการทำงาน
	-	150-250	เริ่มการยับยั้งการทำงาน
Cu	-	800	หยุดการทำงาน
	-	397	การปนเปื้อนที่เกินขีดจำกัดของเขต 5 ของเขตควบคุม
Zn	-	> 500	หยุดการเกิดก๊าซ
	-	350-400	การปนเปื้อนที่เกินขีดจำกัดของเขต 5 ของเขตควบคุม
Ni	-	1,000	บ่งชี้ความเป็นพิษร้ายแรง (completely toxic)
	-	200	บ่งชี้ความเป็นพิษร้ายแรง
Cr	-	367	การปนเปื้อนที่เกินขีดจำกัดของเขต 5 ของเขตควบคุม
	-	500-1,000	บ่งชี้ความเป็นพิษร้ายแรงอย่างรุนแรง (serious toxic)
	-	> 1,000	บ่งชี้ความเป็นพิษร้ายแรง
	-	200	บ่งชี้ความเป็นพิษร้ายแรง
	-	2,000	บ่งชี้ความเป็นพิษร้ายแรง

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของไอออนและโลหะหนักที่เป็นพิษต่อระบบหมักโดยตรง (48)

พิษของซัลไฟด์ (Sulfide Toxicity)

ซัลไฟด์ที่มีในระบบอาจเข้ามากับน้ำเสีย หรืออาจเกิดจากการรีดักชันสารประเภทซัลเฟตหรือการย่อยสลายสารประเภทโบรดิน ซัลไฟด์ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะหนักจะตกตะกอนและไม่ละลายน้ำ ซัลไฟด์ที่ละลายน้ำอยู่จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซัลไฟด์ที่ละลายน้ำมีความเข้มข้น 50 - 100 มก./ล จะไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีความเข้มข้นมากกว่า 2000 มก./ล จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย (29)

4. พิษของสารอินทรีย์ (Toxic Organic Material)

สารอินทรีย์บางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) หรือ กรดไขมันขนาดใหญ่ (Long Chain Fatty Acid) จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เหล่านี้เข้าสู่ระบบสม่ำเสมอ (Continuous Feed) เพื่อให้แบคทีเรียเกิดความคุ้นเคย และปรับตัวได้ หรืออาจแก้ไขโดยการเติมสารเคมี เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของสารที่เป็นพิษ

2.6 การทดลองระบบบำบัดแบบไร้อากาศกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นค่าที่ผ่านมา

Phadke และคณะ (35) ได้ศึกษาระบบ Septic tank ในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี และตะกอนแขวนลอยจะสูงถึงร้อยละ 80 เมื่อระยะเวลาพักเก็บในถังมีค่าประมาณ 20 วัน

Babbit และ Baumann (36) ได้ทำการศึกษา Septic tank ขนาดเล็ก จำนวน 6 ถัง ในการบำบัดน้ำเสียจากเมืองที่มีความเข้มข้นบีโอดีเฉลี่ย 301 มก./ล พบว่าน้ำเสียที่ผ่านจาก Septic tank จะมีบีโอดีเหลืออยู่ในช่วง 63 - 104 มก./ล

Dudley และ Stephenson (37) ได้ทำการศึกษาน้ำเสียที่ผ่านจาก Septic tank พบว่าจะมีปริมาณ บีโอดี แบคทีเรีย อินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในปริมาณสูง

Coulter และคณะ (38) ใช้ระบบถังหมักแบบสัมผัสแล้วตามด้วย ถังกรอง ไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนที่มีความเข้มข้นบีโอดี เฉลี่ย 180 มก./ล พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีมีค่าเฉลี่ยถึงร้อยละ 86 ที่อุณหภูมิ 20 - 25 °C

Raman และ Chakladar (39) ได้ใช้ถังกรองไร้อากาศโดยใช้ อิฐหักเป็นตัวกลางในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากถัง เกรดที่มีความเข้มข้น ของซีโอดี 344 - 648 มก./ล พบว่าถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 33 ถึงร้อยละ 74

Raman และ Khan (40) ได้ศึกษาดังกรองไร้อากาศโดยใช้หินเป็น ตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนที่มีความเข้มข้นบีโอดี 115 - 238 มก./ล ที่อุณหภูมิ 27.5 °C ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 6.4 ชม. พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 72.5

บุญสิน สุภัทวงศ์ (41) ได้ศึกษาดังกรองไร้อากาศ โดยใช้ถังน้ำมัน 200 ลิตร ภายในบรรจุหินกรองขนาด 2.5 - 5.0 ซม. โดยมีความสูงของ หินกรอง 0.5 และ 1.0 ม. บำบัดน้ำเสียจากถัง เกรดที่มีความเข้มข้นของซีโอดี เฉลี่ย 160 มก./ล พบว่า ที่ความสูงของหินกรอง 0.5 ม. มีระยะเวลาพักเก็บ น้ำ 2.5 - 18 ชม. สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 46 ถึงร้อยละ 72 ส่วนที่ ความสูงของหินกรอง 1 ม. มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.5 - 32 ชม. สามารถ กำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 51 ถึงร้อยละ 80

นิตยา มหาผล และคณะ (42) ได้ศึกษาดังอิมซอพ และถังกรองไร้ อากาศในการบำบัดน้ำเสียรวมภายในโรงพยาบาลพระนครศรีอยุธยา ที่มีความ เข้มข้นบีโอดี 80 ถึง 177 มก./ล และมีค่าบีโอดีเฉลี่ย 109 มก/ล ภายใน ถังกรองไร้อากาศบรรจุหินกรองขนาด 2.5 - 5.0 ซม. เป็นตัวกลาง มีความ สูงทั้งหมด 1.8 ม. พบว่ามีความสูงของหินกรอง 1.0 ม. มีระยะเวลาพักเก็บ น้ำ 2.53 - 55.59 ชม. สามารถกำจัดบีโอดีได้ร้อยละ 9.3 ถึง ร้อยละ 91.8 ส่วนที่ความสูงของหินกรอง 1.8 ม. มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.52 - 99.26 ชม. สามารถกำจัดบีโอดีได้ร้อยละ 32.4 ถึงร้อยละ 89.1

และยังพบว่า ที่ความสูงของหินกรอง 1.0 และ 1.8 มีประสิทธิภาพในการบำบัด
น้ำเสียไม่แตกต่างกันที่ระดับน้ำเสียร้อยละ 95

Lettinga และคณะ (43) ได้ศึกษาระบบ Upflow Anaerobic
Sludge Blanket ในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือน โดยถังขนาด 120
ลิตร สูง 2 เมตร ภายในบรรจุเม็ดชั้นสัจจ (Granular Sludge Bed)
รับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย 343 มก./ล พบว่า มีประสิทธิภาพในการ
กำจัด ซีโอดีร้อยละ 66 ถึงร้อยละ 88 ที่อุณหภูมิ 8 - 20 °c



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย