บทที่ 2

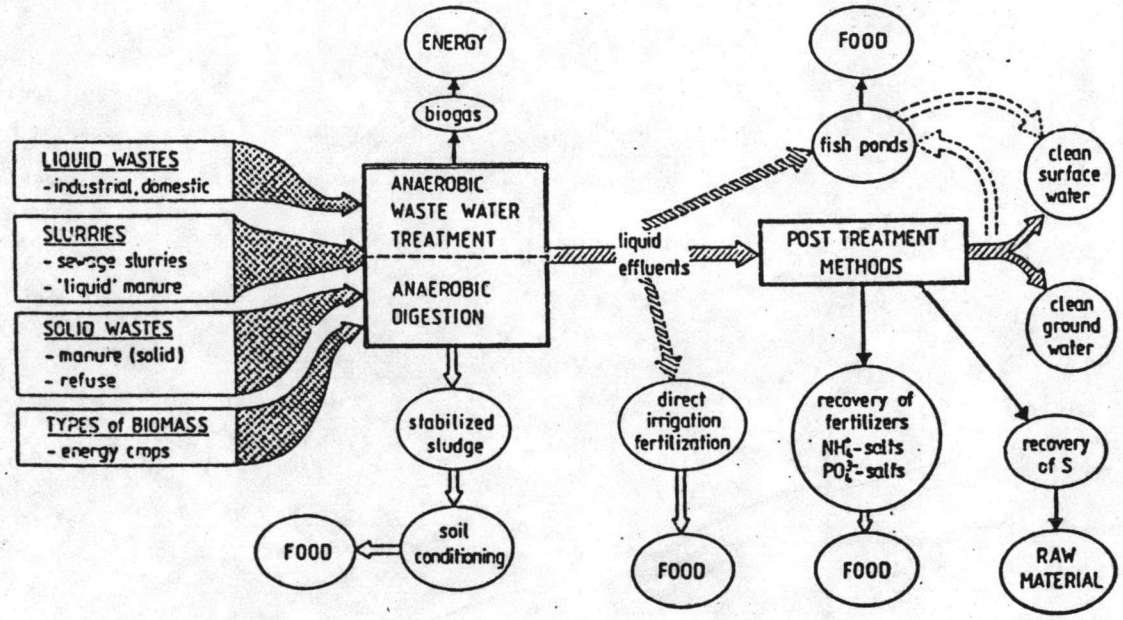
วารสารปริทัศน์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือระบบหมักก๊าซชีวภาพ มีข้อได้เปรียบกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment System) กล่าวคือนอกจากสามารถให้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้แล้ว ยังมีข้อดีอีกหลายประการดังนี้

- กากตะกอนของแข็งที่เหลือจากกระบวนการน้อย
- ตะกอนแบคทีเรียในระบบอยู่ตัวและเสถียรมาก ง่ายต่อการทำให้แห้ง (dewatering)
- ต้องการสารอาหารเสริมต่ำ
- ไม่ต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศให้กับระบบ
- สามารถเก็บตะกอนแบคทีเรียไว้ได้นานหลายเดือนในสภาวะที่ไม่มีสิ่งป้อน

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะขึ้นอยู่กับปริมาณและประสิทธิภาพ (activity) ของแบคทีเรียที่มีอยู่ในระบบ กล่าวคือ ถ้าในระบบมีปริมาณแบคทีเรียภายใต้สภาวะการทำงานมากเท่าใด ก็จะมีศักยภาพในการรับสารอินทรีย์มากขึ้นเท่านั้น แต่เนื่องจากแบคทีเรียมีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้า ทำให้ระบบต้องใช้เวลาในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (start-up) ยาวนาน ดังนั้นอัตราการเติบโตของแบคทีเรียจึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ระบบยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ทำให้ต้องมีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้เหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรียตลอดเวลา ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีข้อด้อยที่สำคัญ คือ ต้องมีระบบบำบัดแบบอื่นก่อนและหลังระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัด (effluent) มีลักษณะสมบัติตามมาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับอุตสาหกรรม สามารถระบายทิ้งลงสู่แหล่งรับน้ำธรรมชาติได้ รูปที่ 2.1 แสดงระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งต้องมีขั้นตอนการบำบัดอื่น ๆ ประกอบ โดย

เน้นการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียต่าง ๆ



รูปที่ 2.1 ระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นส่วนสำคัญในเทคโนโลยีของการบำบัดและการนำเอาน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ (Lettinga and Hulshoff,1991)

2.1 หลักการพื้นฐาน

2.1.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์, การย่อยทำลายซัลเฟต และการย่อยสลายไนเตรต

2.1.1.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

(ก) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต, โปรตีน, ไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยน้ำย่อยจากแบคทีเรียให้มีขนาดเล็กลง แบคทีเรียที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้เป็นแบคทีเรียพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เฉพาะในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (obligate anaerobes) เช่น *Bacteroids, Clostridium, Eubacterium, Lactobacillus* เป็นต้น

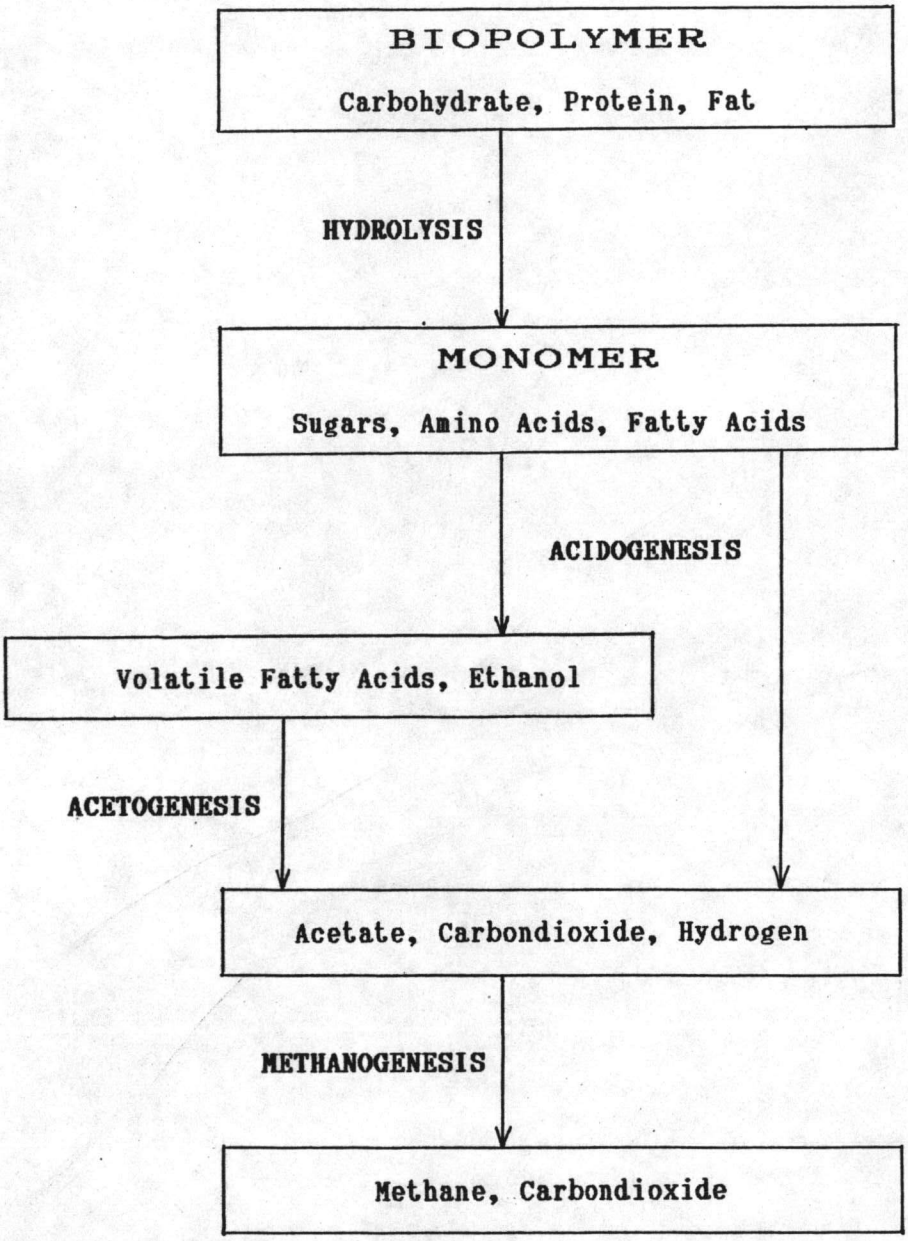
(ข) การสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) สารอินทรีย์ขนาดเล็กจากขั้นตอนไฮโดรไลซีส จะถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (acid forming bacteria) ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) และสารอื่น ๆ ได้แก่ แอลกอฮอล์ (เช่น เอธานอล), คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดนี้ มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี มีอัตราการเติบโตสูง แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ได้แก่ *Aerobactor, Flavobacterium, Pseudomonas* เป็นต้น

นอกจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดแล้ว ในขั้นตอนนี้ยังมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างไฮโดรเจนหรือแบคทีเรียกลุ่ม Acetogenic เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์บางส่วนที่ยังไม่เหมาะสมที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะนำไปใช้ให้เป็นอะซิเตต (acetate), ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้สภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ เนื่องจากไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้ตลอดเวลา (Zinder et al., 1984)

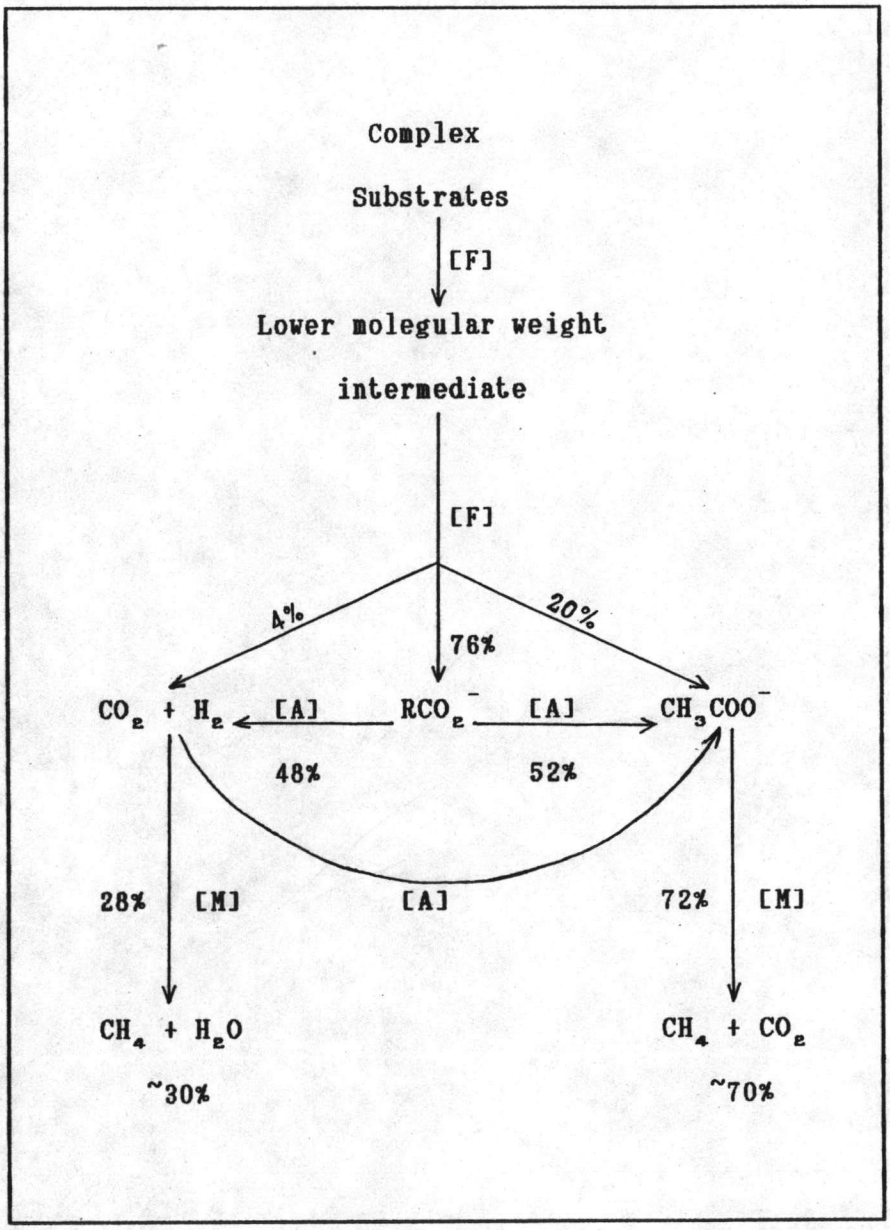
(ค) การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (methane forming bacteria) ย่อยสลายต่อเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนี้ประกอบด้วยแบคทีเรียที่สำคัญ 2 ชนิด คือ แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากอะซิเตต (Aceticlastic methanogen) และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide-reducing methanogen) ซึ่ง 70 % ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้จากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากอะซิเตต โดยหมู่เมทิล (methyl group) ในกรดอินทรีย์จะให้มีเทน และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group)ให้คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนก๊าซมีเทนอีก 30 % นั้น ได้จากปฏิกิริยาการใช้

คาร์บอนไดออกไซด์โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด อัตราการเติบโตช้ากว่า สามารถเติบโตได้ดีในช่วง pH ประมาณ 6.5 ถึง 8 แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ได้แก่ *Methanosarcina barkeri, Methanobacterium formicicum, Methanococcus vanielii, Methanothrix sp.* เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งมีอัตราการเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด

การทำงานของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้-ออกซิเจนนี้ จะดำเนินไปได้ด้วยดีขึ้นอยู่กับการทำงานที่สมดุลกันของแบคทีเรียทั้ง 3 กลุ่ม (Zinder et.al, 1984) โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนซึ่งมีบทบาทสำคัญที่สุด แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนี้เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของระบบ กล่าวคือ การที่ระบบเสียสมดุลหรือล้มเหลวนั้นเนื่องมาจากสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ อัตราการผลิตกรดอะซิติกสูงกว่าอัตราการใช้กรดโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากอะซิเตต ทำให้มีการสะสมของกรดอะซิติก pH ของระบบลดต่ำลงจนระบบเสียสมดุล และ/หรือสาเหตุอีกประการหนึ่ง คือ การที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากปฏิกิริยาการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ไม่สามารถรักษาระดับความดันย่อยของไฮโดรเจนในระบบให้อยู่ในระดับต่ำพอได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์อื่น ๆ เช่นกรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกในระบบเช่นกัน ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระบบหมักที่สมดุล ซึ่งมีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำ (50-100 มก./ล.) ระบบหมักมีประสิทธิภาพสูงโดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซที่ผลิตได้สูงและการกำจัดของแข็งสูง กับระบบหมักที่เสียสมดุล มีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงถึงกว่า 2,000 มก./ล. มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซและการกำจัดของแข็งต่ำ



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Breue, 1991)



รูปที่ 2.3 การเกิดมีเทนโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนของโพลิแซคคาร์ไรด์, โปรตีน, ไขมัน และสารประกอบอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างซับซ้อน; [F] = fermentative bacteria, [A] = acedogenic bacteria, [M] = methanogenic bacteria (Klass, 1984)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิปานกลาง (Breure,1991)

	Acidogenic bacteria		Acetogenic bacteria	Methanogenic bacteria
	carbohydrate	protein		
maximal yield ($g.g^{-1}$)	0.08 - 0.20	0.06 - 0.15	0.01	<0.02
pH optimum	5.8	7	6.5 - 8	6.5 - 8
maximal growth rate (h^{-1})	0.33	0.23	0.02	0.005 - 0.02
doubling time (h)	3	4	50	50 - 200

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าดรรชนีในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปกติและสภาวะที่ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงาน (Pohland and Ghosh,1971)

Digestion Condition	Gas production		Total Alkalinity	Total Oganic	Volatile Solids
	ft^3 / VS added	CO_2 %	mg / l as $CaCO_3$	Acid, mg / l as CH_3COOH	Conversion %
Normal	8 to 10	25 to 35	1500 to 5000	50 to 300	50 to 60
Retarded	< 7	35 to 45	1000 to 3000	> 2000	< 40

ตารางที่ 2.3 สมการปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และค่าพลังงานอิสระ (ΔG°) ที่สภาวะมาตรฐาน : 25 °ซ, pH 7, ความเข้มข้นของสารละลาย (aqueous solution) 1 unit activity มีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ในสถานะก๊าซ (Klass, 1984, Breure,1991)

Reaction	ΔG° (kJ)
Fermentative bacteria	
$(C_6H_{10}O_5) + H_2O = C_6H_{12}O_6$	-17.7
$C_6H_{12}O_6 = 3CH_3CO_2^- + 3H^+$	-311
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = CH_3CH_2CO_2^- + H^+ + 3CO_2 + 5H_2$	-192
$C_6H_{12}O_6 = CH_3CH_2CH_2CO_2^- + H^+ + 2CO_2 + H_2$	-264
$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O = 6CO_2 + 12H_2$	-25.9
$2CH_2(NH_2)CO_2H + 4H_2O = CH_3CO_2^- + 2HCO_3^- + H^+ + 2H_2 + 2NH_4^+$	-52
$CO_2HCH(NH_2)(CH_2)_2CO_2H + 3H_2O = 2CH_3CO_2^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2 + NH_4^+$	-34
$CH_2(NH_2)CO_2H + H_2 = CH_3CO_2^- + NH_4^+$	-78
$CH_3CH(NH_2)CO_2H + 3H_2O = CH_3CO_2^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2 + NH_4^+$	+8
Acetogenic bacteria	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3CO_2^- + 2H^+ + 2CO_2 + 4H_2$	-216
$CH_3CH_2CO_2^- + H^+ + 2H_2O = CH_3CO_2^- + H^+ + CO_2 + 3H_2$	+71.7
$CH_3CH_2CH_2CO_2^- + H^+ + 2H_2O = 2CH_3CO_2^- + 2H^+ + 2H_2$	+48.3
$CH_3CH_2OH + H_2O = CH_3CO_2^- + H^+ + 2H_2$	+9.7
$2CO_2 + 4H_2 = CH_3CO_2^- + H^+ + 2H_2O$	-94.9
Methanogenic bacteria	
$CH_3CO_2^- + H^+ = CH_4 + CO_2$	-35.8
$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O$	-131
$HCO_3^- + H^+ + 4H_2 = CH_4 + 3H_2O$	-136

การที่แบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ย่อยสลายสารอินทรีย์ ก็เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการเติบโต ซึ่งปฏิกิริยาการสร้างพลังงานส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ พลังงานที่แบคทีเรียนำไปใช้จะอยู่ในรูปของ ATP (Adenosine-Tri-Phosphate) พลังงานที่แบคทีเรียได้รับจะมากน้อยขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารอาหาร, ผลิตภัณฑ์ที่ได้, ความเข้มข้นของสารอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ได้ และสภาวะทางกายภาพและทางชีวเคมีของระบบ

- พลังงานที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนอกเซล และพลังงานที่ได้ยังไม่อยู่ในรูปที่แบคทีเรียจะนำไปใช้ได้ นั่นคือแบคทีเรียไม่สามารถเติบโตได้โดยอาศัยเฉพาะการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เท่านั้น

- พลังงานที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ เป็นพลังงานในรูปที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งพลังงานที่ได้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารอาหารและรูปของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการสร้างกรดจากกลูโคสสูงกว่าที่ได้จากกรดอะมิโน

- พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยที่มีมวลโมเลกุลสูงโดยแบคทีเรียกลุ่ม acetogenic พบว่า ค่า ΔG° เป็น (+) นั่นหมายถึงว่า ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25 °ซ, pH 7 และ 1 บรรยากาศ) การจะเกิดปฏิกิริยาได้ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก (cost energy) หรือ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้าได้ ต้องอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณผลิตภัณฑ์ต่ำเท่านั้น

- พลังงานที่ได้จากการสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก มีค่าต่ำกว่าพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาสร้างกรดจากกลูโคส ซึ่งทำให้อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากกรดอะซิติกต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด

2.1.1.2 <u>ปฏิกิริยาการย่อยทำลายซัลเฟต</u> (Sulphate Reduction)

ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซัลเฟตในน้ำเสียสามารถถูกนำไปใช้เป็นแหล่งให้ออกซิเจนโดยแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งเรียกว่า Sulphate reducing bacteria โดยได้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซัลเฟตกับสารอินทรีย์ ดังสมการ (สุเมธ ชวเดช, 2529)

$$SO_4^{2-} + \text{organic matter} \xrightarrow[\text{Bacteria}]{\text{Sulphate Reducing}} S^{2+} + H_2O + CO_2$$

เช่นแบคทีเรียพวก *Desulforibrio* ได้พลังงานจากปฏิกิริยาดังนี้

$$SO_4^{2-} + 4H_2 \longrightarrow H_2S + 2\,H_2O + 2\,OH^-$$
$$SO_4^{2-} + CH_3COOH \longrightarrow H_2S + 2\,HCO_3^-$$

จะเห็นว่าปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยทำลายซัลเฟตโดยแบคทีเรียกลุ่ม Sulphate reducing bacteria นี้ จะได้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีกลิ่นเหม็นรบกวน ซึ่งมักจะเกิดในท่อระบายน้ำเสียทั่วไป และในบ่อหมัก แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างในน้ำเสีย (pH) และอุณหภูมิได้ดี ดังนั้นการเกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงเกิดขึ้นทั่วไปไม่ว่าระบบหมักนั้นจะอยู่ในสภาพใดก็ตาม กลิ่นก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบหมักเป็นกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นั่นเอง ความรุนแรงของกลิ่นเหม็นจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้มีความสัมพันธ์กับค่า pH ของน้ำเสียนั้น ดังแสดงในสมการเคมีข้างล่างนี้

$$H_2S \rightleftharpoons HS^- + H^+$$
$$\Downarrow\Uparrow$$
$$2\,H^+ + S^{2-}$$

จะเห็นได้ว่าภายใต้สภาพที่เป็นกรด ระบบหมักจะมีกลิ่นเหม็นรุนแรงขึ้น ดังนั้นในการควบคุมปัญหากลิ่นเหม็นรบกวนในระบบหมัก จึงต้องปรับค่า pH ให้สูงกว่า 7 ขึ้นไป ในระบบหมักทั่วไปที่อยู่ในสภาพเป็นกลาง (pH ประมาณ 7) จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวระหว่างโลหะอิออนกับซัลไฟด์เป็นตะกอนดำของโลหะซัลไฟด์ จึงทำให้ตะกอนแบคทีเรียในระบบหมักเป็นสีดำ แต่ถ้าในกรณีระบบหมักนั้นมีสภาพเป็นกรด หรืออยู่ในช่วงขั้นตอนการสร้างกรด จะไม่เกิดการตกตะกอนของโลหะซัลไฟด์ ดังนั้นตะกอนแบคทีเรียจะมีสีเทา และมีกลิ่นเหม็นรุนแรง (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.1.3 ปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารไนเตรต (Denitrification)

น้ำเสียที่มีสารไนเตรตและอยู่ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างสารไนเตรตกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า Denitrifying bacteria แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ได้แก่ *Achromobacter, Bacillus, Micrococcus* และ *Pseudomonas* ตัวอย่าง เช่น สารอินทรีย์เป็นเมธานอล ไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนดังสมการ (สุเมธ ชวเดช, 2529)

$$NO_3^- + (5/6)CH_3OH \longrightarrow (1/2)N_2 + (5/6)CO_2 + (7/6)H_2O + OH^- + Energy$$

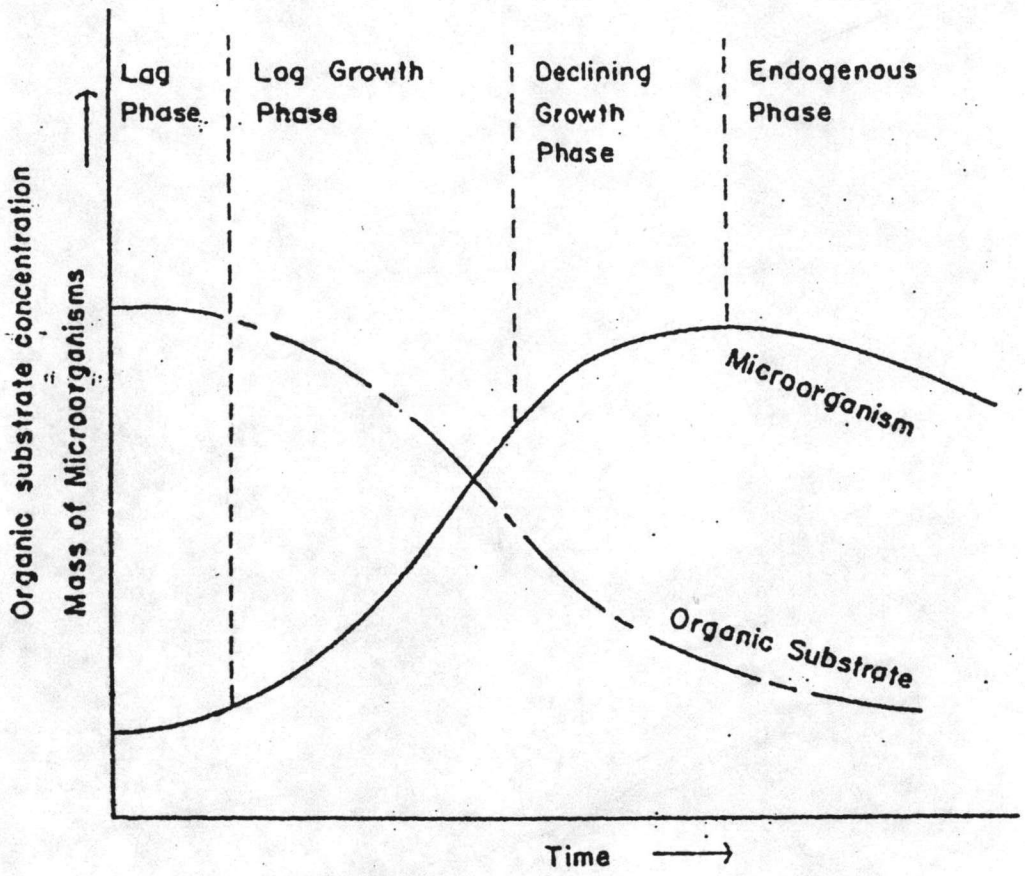
2.1.2 ลักษณะการเติบโตของแบคทีเรีย (Microbial Growth)

ในกรณีที่มีแบคทีเรียจำนวนหนึ่งในน้ำ แล้วเติมน้ำเสียลงไปจำนวนไม่มากจนเกิดสภาพ short load กล่าวคือ ไม่เกิดสภาพการสะสมกรดอินทรีย์แล้ว ปริมาณแบคทีเรียในน้ำเสียจะมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 2.4 ลักษณะการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียอาจแบ่งได้เป็น 4 ช่วงสำคัญ ๆ ดังนี้

2.1 Lag phase เป็นช่วงแรกที่แบคทีเรียทำความคุ้นเคยต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งจำนวนของแบคทีเรียและความเข้มข้นสารอินทรีย์ ถ้ามีสารพิษหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ยากต่อแบคทีเรียในการย่อยสลาย ช่วง Lag phase นี้จะยาวนานมากขึ้น ในสภาวะไม่มีออกซิเจน พบว่าอัตราส่วนระหว่างอาหารต่อปริมาณแบคทีเรีย (F/M ratio) มากกว่า 2.5 จะเกิด Lag phase ขึ้น

2.2 Log growth phase เป็นช่วงที่แบคทีเรียคุ้นเคยต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียแล้ว และปริมาณอาหารมีอยู่อย่างมากมาย ดังนั้นอัตราการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียจะสูงขึ้นตลอดเวลา และขณะเดียวกันอัตราการลดของปริมาณสารอินทรีย์จะสูงขึ้นตลอดเวลาด้วย

2.3 Declining growth phase เป็นช่วงที่ถัดจากช่วง Log growth คือเป็นระยะที่สารอินทรีย์ที่เป็นอาหารแก่แบคทีเรียเริ่มน้อยลง ดังนั้นอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะต่ำลง และอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จะช้าลง ส่วนใหญ่ในระบบย่อยสลาย



รูปที่ 2.4 การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (สุเมธ ชวเดช, 2529)

สารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะควบคุมให้อยู่ในช่วง Declining growth phase เนื่องจากจุดประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียต้องการลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ต่ำที่สุด และต้องการให้ได้ก๊าซชีวภาพสูงสุดด้วย

2.4 Endogenous phase เป็นช่วงระยะสุดท้ายเมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยทำลายจนเกือบหมด ดังนั้นจึงเกิดสภาพการขาดแคลนอาหาร แบคทีเรียบางส่วนจะตายลดจำนวนลง จะเกิดกระบวนการย่อยทำลายเซลแบคทีเรียเอง (cell lysis) สารอินทรีย์จากแบคทีเรียที่ตายลงจะเป็นอาหารให้กับแบคทีเรียที่ยังมีชีวิตอยู่ ดังนั้นแบคทีเรียในช่วงนี้จะมีจำนวนน้อยลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะต่ำสุด ถึงแม้ว่าการเจริญเติบโตในช่วงนี้จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดก็ตาม แต่มีข้อเสียที่ต้องออกแบบระบบบำบัดให้มีขนาดใหญ่มาก จึงทำให้ค่าก่อสร้างระบบสูงกว่าการออกแบบให้ระบบหมักทำงานในช่วงอื่น ๆ ดังนั้นจึงไม่นิยม

ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป นอกจากในกรณีที่โรงงานมีที่ดินจำนวนมาก ๆ อาจออกแบบบ่อหมักที่มีระยะเวลาในการกักเก็บสูงมาก โดยบ่อท้าย ๆ อยู่ในสภาพ Endogenous phase

2.1.3 การเกิดก๊าซมีเทน

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 พบว่า ค่าพลังงานอิสระ (ΔG°) ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตต (Acitogenesis) นั้นมีค่าเป็น (+) เล็กน้อย นั่นหมายถึงว่าการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะซิเตตและไฮโดรเจนนั้น เกิดขึ้นได้ยาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตตจะถูกยับยั้งเมื่อมีปริมาณไฮโดรเจนในระบบสูง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$CH_3CH_2OH + H_2O = CH_3COO^- + H^+ + 2H_2 \quad \Delta G^\circ = +9.7\ KJ \quad (2.1)$$

$$CH_3CH_2COO^- + H^+ + H_2O = CHCOO^- + H^+ + C_2O + 3H_2 \quad \Delta G^\circ = +71.7\ KJ \quad (2.2)$$

$$CH_3(CH_2)_2COO^- + H^+ + 2H_2O = 2CH_3COO^- + 2H^+ + 2H_2 \quad \Delta G^\circ = +48.3\ KJ \quad (2.3)$$

หากมีการนำไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไปใช้ตลอดเวลาก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ดีขึ้น สมการปฏิกิริยาการนำไฮโดรเจนไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน แสดงในสมการ (2.4) และปฏิกิริยา Methanation ระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน แสดงในสมการ (2.5)

$$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O \quad \Delta G^\circ = -131\ KJ \quad (2.4)$$

$$2CO_2 + 4H_2 = CH_3COO^- + H^+ + 2H_2O \quad \Delta G^\circ = -94.9\ KJ \quad (2.5)$$

ซึ่งมีค่า ΔG° เป็น (-) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตตนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นเดี่ยว ๆ ได้ จำเป็นต้องเกิดควบคู่ไปกับปฏิกิริยาการนำไฮโดรเจนไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเสมอ ซึ่งอาจแสดงได้ดังสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังนี้ (Breure,

1991)

ปฏิกิริยา Acetogenesis : $aA + bB \longrightarrow cC + dD$ (2.6)

ที่สภาวะมาตรฐาน : 25 °ซ, ความดัน 1 บรรยากาศ และ ความเข้มข้นของสารละลาย 1 ยูนิตแอคติวิตี้

$$\Delta G^{\circ} = -2.3\ RT \log K$$

เมื่อ K = ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$= \frac{[C]^{c}_{eq} \cdot [D]^{d}_{eq}}{[A]^{a}_{eq} \cdot [B]^{b}_{eq}}$$

ที่สภาวะของการทำงาน :

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + 2.3\ RT \log \text{ช}$$

เมื่อ ช $= \frac{[C]^{c}_{obs} \cdot [D]^{d}_{obs}}{[A]^{a}_{obs} \cdot [B]^{b}_{obs}}$

การเกิดปฏิกิริยา Acetogenesis ได้ดี ΔG ต้องมีค่าเป็น (-) แต่ ΔG° มีค่าเป็น (+) ดังนั้น ช ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 นั่นคือ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในระบบต่ำ (ซึ่งในที่นี้คือ ไฮโดรเจน) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในกรณีที่มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนร่วมอยู่ด้วยเท่านั้น

2.1.4 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

2.1.4.1 อุณหภูมิ อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อแบคทีเรียเป็นอันมาก ซึ่งอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนนี้ จะได้กล่าวถึงต่อไปในส่วนของการย่อยสลายในช่วงอุณหภูมิสูง

2.1.4.2 ความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าความเป็นกรดด่างของระบบ หรือ pH มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มาก ช่วง pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียคือ ช่วงที่เป็นกลาง (pH ประมาณ 6.5-7.8) ถ้าค่า pH ในระบบหมักมีค่าต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะต่ำลง

และถ้าค่า pH นี้ต่ำถึง 5.0 ก็จะมีอันตรายอย่างรุนแรงต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดมีความสามารถคงทนต่อสภาพเป็นกรดได้ต่ำถึง 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้ย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วขับถ่ายของเสียเป็นพวกกรดอินทรีย์ ดังนั้นโดยธรรมชาติแล้วจึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้มีความคงทนต่อสภาพเป็นกรดได้ดีกว่าแบคทีเรียโดยทั่วไป ค่า pH ในถังหมักมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acid) ในถังหมักนั้นซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.4.3 <u>ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)</u> คือความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอน ค่าสภาพความเป็นด่างวัดเป็น มก./ล. ในรูปของ $CaCO_3$ ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต, คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ จำนวนอนุมูลเหล่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นกับค่า pH ดังนั้นค่าสภาพความเป็นด่างในระบบหมักเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างสูงย่อมแสดงว่าระบบหมักมีความสามารถในการรักษาสภาพความเป็นกรดด่าง (buffering capacity) สูงในการรักษาค่า pH ให้คงตัวอยู่ได้นานต่อการเพิ่มของปริมาณกรดใด ๆ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างต่ำก็จะแสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบค่อนข้างสูง จำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมัก เพราะมีความโน้มเอียงที่จะเป็นกรดได้ง่าย ค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อระบบหมักประมาณ 1,000-3,000 มก./ล. ในระบบหมักที่ทำงานสมบูรณ์ ค่าสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแอมโมเนียมที่เกิดจากการย่อยสลายสารโปรตีน กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แบคทีเรียขับออกมา ดังสมการ (สุเมธ ชวเดช, 2529)

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow NH_3HCO_3$$

2.1.4.4 <u>กรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acid)</u> ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น มีแบคทีเรีย 2 กลุ่มซึ่งอาจอาศัยอยู่ร่วมกันหรือแยกกันก็ได้ โดยกลุ่มแรกจะย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วปล่อยกรดอินทรีย์ (VFA) เป็น

ของเสียแล้วแบคทีเรียกลุ่มที่สองจะใช้กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหาร โดยให้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นจะเห็นว่าในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้จะมีกรดอินทรีย์เป็นสารระหว่างปฏิกิริยา (intermediate product) กรดอินทรีย์นี้อาจสะสมได้ในกรณีที่ระบบไม่อยู่ในสมดุล คือมีการสร้างกรดอินทรีย์มากกว่าการใช้กรดอินทรีย์ ถ้ามีการสะสมกรดอินทรีย์เกิดขึ้นในระบบในช่วงแรกจะลดค่าสภาพความเป็นด่างก่อน และค่า pH ลดลงในที่สุด ถ้าค่า pH ในระบบต่ำกว่า 6.5 ก็จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ในกรณีที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์สูงมากจนค่า pH ต่ำกว่า 6.5 ถ้าไม่ทำการแก้ไข ในที่สุดค่า pH จะลดลงถึง 4.5-5.0 ซึ่งจะทำให้ระบบหมักเกิดสภาพเสียสมดุลระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งสังเกตได้จากมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวรุนแรง และสัดส่วนของก๊าซมีเทนต่ำมาก โดยปกติในสภาพของการหมักที่สมบูรณ์ควรมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนประมาณ 70 % (สุเมธ ชวเดช, 2529)

กรดอินทรีย์ที่ตรวจพบในระบบหมักส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอะซิติก, กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก โดยส่วนใหญ่จะเป็นกรดอะซิติก ในสภาพ pH ที่เป็นกลางกรดเหล่านี้จะอยู่ในรูปอะซิเตต, โพรพิโอเนต และบิวทิเรต ดังนั้นความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะต่ำกว่าในรูปกรดอิสระ การวัดปริมาณกรดอินทรีย์จึงวัดในรูป มก./ล. ของกรดอะซิติก โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักไม่ควรเกิน 2,000 มก./ล. แต่อาจทนได้ถึง 5,000 มก./ล. (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.4.5 <u>ธาตุอาหารเสริมสร้าง (Nutrients)</u> ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนโดยแบคทีเรียนั้น ธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมากได้แก่ ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) อัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมักควรมีอัตราส่วน COD:N:P = 100:2.2:0.4 หรือ BOD:N:P = 100:1.1:0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพจะต่ำลง แต่ตรงกันข้ามถ้ามีธาตุไนโตรเจนมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียหรือเปลี่ยนสภาพแบคทีเรียได้ เช่น ตะกอนแบคทีเรียลอยตัวหลุดออกจากระบบ นอกจากธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ธาตุอื่น ๆ ที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้แก่ Ca, Mg, Mo, Co และ Fe แต่แบคทีเรียต้องการในปริมาณน้อยมาก ดังนั้น

ธาตุเหล่านี้โดยทั่วไปจึงมีเพียงพอในน้ำเสียอยู่แล้ว ในทางปฏิบัติจึงคำนึงถึงปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่านั้น ถ้าตรวจวิเคราะห์ว่ามีไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเติมสารสองตัวดังกล่าวให้เพียงพอ (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.4.6 <u>สารพิษ (Toxic substance)</u> สารอนินทรีย์เกือบทุกสารถ้ามีปริมาณมากเกินไปในระบบหมักก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นกับสารนั้น ๆ โดยทั่วไปพวกที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะส่งผลพิษรุนแรงกว่าพวกที่มีน้ำหนักอะตอมเบากว่า และอิออนที่มี valency สูง จะส่งผลพิษรุนแรงกว่าพวกอิออนที่มี valency ต่ำกว่า นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพวกวงแหวนเบนซีน (benzene ring) ซึ่งแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ ถ้ามีมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียอีกด้วย ตารางที่ 2.4 แสดงระดับความเข้มข้นของสารพิษที่มีอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในสภาวะเป็นจริงปรากฏว่าน้ำเสียมีปริมาณสารพิษหลายชนิดปะปนอยู่และมีปริมาณสูง แต่ปรากฏว่าน้ำเสียดังกล่าวยังสามารถถูกย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนได้ โดยไม่แสดงความเป็นพิษให้เห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย เช่น การตกตะกอนของสารพิษ (precipitation), การถูกทำลายเปลี่ยนไปเป็นสารรูปอื่น และการรวมตัวของอิออนต่าง ๆ จึงเกิดสภาพลดหรือเสริมความเป็นพิษ (antagonism and synergism) นอกจากนี้ยังขึ้นกับค่า pH ในระบบหมักอีกด้วย (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.4.7 <u>การเติม (Feeding Mode)</u> การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักอาจแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ

(1) เติมครั้งเดียว (batch feed)

(2) เติมกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous mode)

(3) เติมต่อเนื่อง (continuous mode)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักแบบต่อเนื่องตลอดเวลา จะมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะสภาวะภายในถังหมักคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนวิธีแรกซึ่งเป็นการเติมน้ำเสียครั้งเดียว ระบบหมักจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากสภาพต่าง ๆ เช่นความเข้มข้นสารอินทรีย์เป็นต้น เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงทำให้แบคทีเรียต้องปรับตัวตลอดเวลา ดังนั้นในทางปฏิบัติมักเลือกวิธีเติมแบบต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีเป็นช่วง ๆ ก็จำเป็นต้องใช้วิธีเติมแบบกึ่ง

ตารางที่ 2.4 ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (สุเมธ ชวเดช, 2529)

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มก./ล.)
Cu	1.0
Zn	5.0
Cr^{6+}	5.0
Cr^{3+}	2,000
Total Chromium	5.0
Ni	2.0
Cd	0.02
S^{2-}	100
SO_4^{2-}	500
Ammonia	1,500
Na^{+}	3,500
K^{+}	2,500
Ca^{2+}	2,500
Mg^{2+}	1,000
Acrylonitrite	5.0
Benzene	50
CCl_4	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1.0

ต่อเนื่องแทน (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.4.8 <u>การกวนผสม (Mixing)</u> การกวนผสมน้ำในระบบหมักมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบหมักมาก เพราะจะช่วยให้แบคทีเรียมีโอกาสสัมผัสกับสารอาหารได้ทั่วถึง นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยทำให้สภาพต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ สารอินทรีย์ ตลอดจนสารพิษกระจายทั่วกันทั้งระบบอีกด้วย การกวนผสมอาจทำได้โดยใช้เครื่องกวน ใช้การรีไซเคิลก๊าซชีวภาพกลับเข้าไปในถังหมักเพื่อกวนผสม และ/หรือ สูบน้ำหมุนเวียนให้สูงขึ้นในถังหมัก (สุเมธ ชวเดช, 2529)

2.1.5. <u>ตัวแปรที่ใช้ในการบ่งบอกการทำงานของกระบวนการหมักยูเอเอสบี</u>

ตัวแปรที่สำคัญที่บ่งชี้สภาวะการทำงานของระบบหมักยูเอเอสบี ได้แก่ ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity), ปริมาณก๊าซมีเทนที่เป็นผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วน CO_2/CH_4 ในก๊าซที่ผลิตได้ (Schroeder, 1977)

ค่าสภาพความเป็นด่างเป็นการวัดปริมาณกรดที่ต้องการในการทำให้ pH ของระบบลดลงจนอยู่ในช่วงจุดยุติของ methyl orange (pH ประมาณ 4) และคำนวณในหน่วยของ $CaCO_3$ ค่าสภาพความเป็นด่างสูงมากเท่าใด แสดงว่ามีความสามารถในการรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ให้ลดต่ำลงเมื่อมีปริมาณกรดสูงขึ้น หรือเรียกว่าระบบมี buffer capacity สูง ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วค่าสภาพความเป็นด่าง เป็นตัวแปรที่มีความไวมากกว่าค่า pH ถ้าค่าสภาพความเป็นด่างลดลง ก็เป็นสัญญาณว่าระบบเริ่มไม่สมดุล ก่อนที่ค่า pH จะลดลง

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เป็นผลิตภัณฑ์ เป็นตัวแปรซึ่งไวต่อการเปลี่ยนแปลงภายในระบบเช่นเดียวกับค่าสภาพความเป็นด่าง มีหน่วยเป็น $ม^3./ชม.$ หรือ $ฟุต^3/ชม.$ การเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์มักทำให้ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย ซึ่งถ้าค่าสภาพความเป็นด่างยังสูงพอ ค่า pH จะลดลงไม่มากนัก และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างคงที่และปรับตัวให้เพิ่มขึ้นได้ที่สภาวะใหม่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ไม่ได้หมายความว่าระบบจะถูกรบกวนเสมอไป ขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น ๆ ในระบบด้วย

อัตราส่วนระหว่าง CO_2/CH_4 มีความหมายเช่นเดียวกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เป็นผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนสำหรับระบบหมักโดยทั่ว ๆ ไปประมาณ 0.7 (มีมีเทนประมาณ 60 %

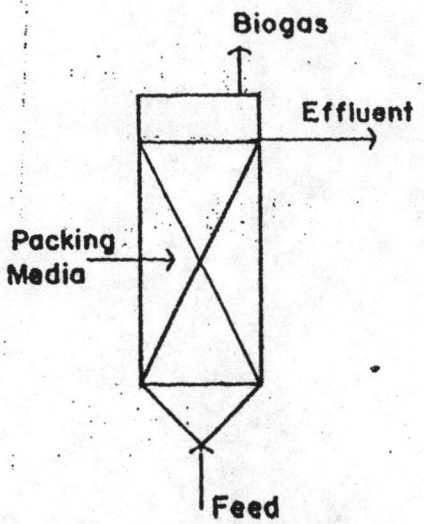
หรือคิดเป็นอัตราส่วน $CO_2:CH_4 = 2:3$) ซึ่งสำหรับน้ำเสียแต่ละชนิดก็จะให้ค่าที่แตกต่างกันออกไป การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนี้อย่างกระทันหัน แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการหมักกรดเพิ่มขึ้น (คาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการหมักกรด) ซึ่งสามารถแสดงถึงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นได้ด้วย

2.2 รูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment Systems)

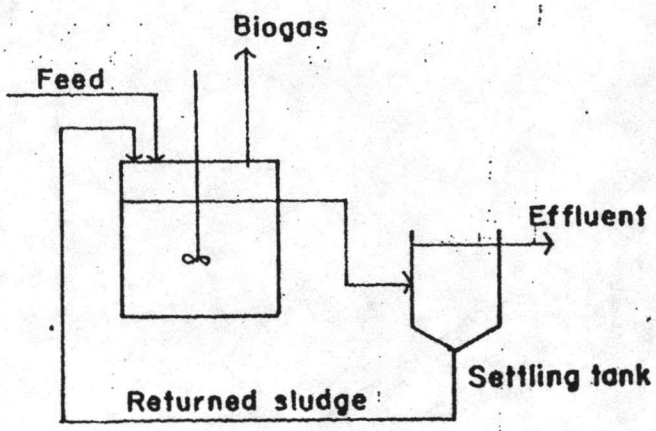
ความสามารถในการรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ หรือประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในถังหมัก และปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก ระบบบำบัดแบบดั้งเดิม (Conventional anaerobic process) นั้นมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบต่ำ นอกจากนี้ ยังไม่สามารถนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ได้อย่างเต็มที่ จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นระบบประสิทธิภาพสูง (High-Rate anaerobic processes) โดยมุ่งที่จะให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นนั่นเอง หลักการที่สำคัญของระบบประสิทธิภาพสูง คือ การเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในระบบให้สูงขึ้น และการรักษาให้ตะกอนแบคทีเรียนั้นอยู่ในระบบได้เป็นเวลานาน (ระยะเวลากักเก็บตะกอนแบคทีเรียในถังหมักสูง) ระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงได้แก่ Anaerobic Contact Process, Anaerobic Filter, Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) และ Anaerobic Fluid Bed เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.2.1 ระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทค (Anaerobic Contact Process)

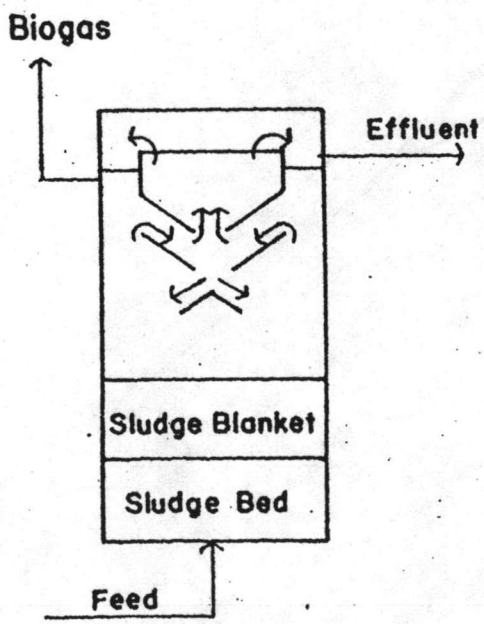
มีลักษณะที่สำคัญ คือ แบคทีเรียที่ออกมาพร้อมกับน้ำที่ออกจากถังหมัก (หรือแบคทีเรียที่ถูก wash out ออกมา) จะเข้าสู่ถังตกตะกอน เกิดการตกตะกอนแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นน้ำเสีย และจะถูกนำกลับไปรีไซเคิลเข้าสู่ถังหมักอีก การแยกตะกอนแบคทีเรียออกจากน้ำเสียโดยทั่วไปใช้ถังตกตะกอน ซึ่งอาจใช้สารพวก flocculant ช่วยในการตกตะกอน หรือใช้ร่วมกับ vacuum degasification หรือการเหวี่ยงแยก (centrifugation ถังหมักของระบบแอนแอโรบิกคอนแทคนี้จำเป็นต้องมีการกวนผสมอย่างดี เพื่อให้น้ำเสียสัมผัสกับ



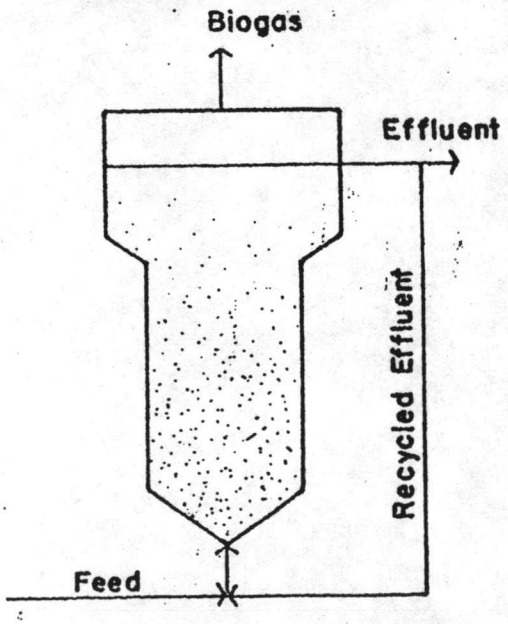
Anaerobic Filter



Anaerobic Contact Process



Upflow Anaerobic Sludge Blanket



Anaerobic Fluid Bed

รูปที่ 2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนชนิดประสิทธิภาพสูง
(สุเมธ ชวเดช, 2529)

ตะกอนแบคทีเรียอย่างทั่วถึง ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำเอาก๊าซที่เกิดขึ้นกลับมาใช้ในการกวนผสมในถังหมัก (gas recirculation) การใช้การกวนทางกลแบบต่อเนื่องหรือแบบกึ่งต่อเนื่อง หรือการให้น้ำเสียไหลเข้าถังหมักทางด้านล่างขึ้นไปผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรียที่อัดตัวกันอยู่ที่ก้นถังหมักที่อัตราการไหลที่เหมาะสม โดยพบว่าการกวนผสมโดยใช้ก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงที่สุด สามารถประยุกต์ใช้กับถังหมักรูปแบบต่าง ๆ ได้ดี ระบบแอนแอโรบิกคอนแทคจะมีการติดตั้งส่วนที่เกี่ยวกับการตกตะกอน และนำตะกอนแบคทีเรียกลับมาใช้ เช่น clarifier เอาไว้ภายนอกแยกต่างหากจากถังหมัก ข้อจำกัดของระบบแอนแอโรบิกคอนแทค คือ ระยะเวลากักเก็บตะกอนในถังหมักต่ำ (Sludge Retention Time; SRT) เนื่องจากจะมีการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียบางส่วนไปกับน้ำเสียที่ออกจาก clarifier ซึ่งปริมาณที่สูญเสียจะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ด้วย นอกจากนี้การควบคุมดูแลระบบหมักนี้มีความยุ่งยากกว่าระบบหมักอื่น ๆ

2.2.2 ระบบหมักตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter)

เป็นระบบที่ประกอบด้วยถังหมักทรงกระบอกรูปทรงสูงหรืออาจเป็นทรงเหลี่ยม ภายในถังหมักบรรจุด้วยตัวกลาง (Filter Media) ซึ่งตัวกลางนี้จะเป็นวัสดุซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยา (inert material) และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูง ได้แก่ ทราย, หิน, ถ่าน หรือตัวกลางที่เป็นพลาสติก (plastic media) โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวกลางที่เป็นพลาสติก แบคทีเรียที่เกิดขึ้นในระบบมีลักษณะการจมตัวที่ดีจะกองตัวอยู่ก้นถัง นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียเกาะติดเป็นเมือกหนาบนผิวและในโพรงของตัวกลาง จึงทำให้ค่า SRT ของระบบตัวกลางกรองนี้สูง การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ สามารถเข้าได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของถังหมัก ในกรณีที่น้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังหมัก น้ำเสียจะสัมผัสกับตะกอนแบคทีเรียที่ตกตะกอนอยู่ก้นถัง เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้น ได้ก๊าซชีวภาพ เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำเสียและการที่ก๊าซที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่ด้านบน ทำให้ตะกอนแบคทีเรียให้ลอยขึ้นตามไปด้วย โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียยังคงถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ถูกพาขึ้นมาและแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางที่น้ำเสียนั้นไหลผ่าน เมื่อตะกอนแบคทีเรียที่ลอยขึ้นมากระทบกับตัวกลาง ก็จะตกลงมายังส่วนล่างของถังหมัก เป็นการนำตะกอนแบคทีเรียกลับมาใช้ในระบบอีก นอกจากนี้ตัวกลางยังทำหน้าที่กระจายการไหลของน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียสัมผัสกับตะกอนแบคทีเรียได้อย่างทั่วถึง

มากขึ้นอีกด้วย

ระบบตัวกลางกรองนี้เหมาะกับน้ำเสียที่เป็น dissolved waste คือมีปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำอยู่ต่ำ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แม้จะใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์และอัตราการไหลที่สูงก็ตาม สำหรับน้ำเสียที่เป็น partially soluble waste ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบนี้ เนื่องจากจะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันตามมาได้

ข้อได้เปรียบของระบบตัวกลางกรองเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแอนแนโรบิก-คอนแทค อาจสรุปได้ดังนี้

- การออกแบบระบบง่าย
- ไม่จำเป็นต้องมีการกวนผสมในถังหมัก
- ไม่จำเป็นต้องมีการนำเอาตะกอนแบคทีเรียหรือน้ำเสียที่ออกจากระบบกลับมารีไซเคิล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ
- มีการสะสมของตะกอนแบคทีเรียในตัวกลางสูง มีการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียไปกับน้ำเสียที่ออกจากระบบน้อยมาก ทำให้มีระยะเวลากักเก็บตะกอนแบคทีเรียสูง
- ปริมาณกากตะกอนจากระบบต่ำ
- สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้นานโดยไม่ต้องไขตะกอนทิ้งเนื่องจากการอุดตัน โดยเฉพาะเมื่อใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งต่ำ และอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำ โดยที่ตะกอนแบคทีเรียที่มีในระบบนั้นมิได้ลดประสิทธิภาพลงเลย อย่างไรก็ตาม การไขตะกอนออกทิ้งบ้างจะช่วยลดปัญหาการอุดตันที่จะตามมาลงได้
- สามารถทนต่อการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในทันที (shock load) ได้ ซึ่งถ้า shock load นี้เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาเพียงสั้น ๆ คุณภาพของน้ำเสียที่ออกจากระบบจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้กับการป้อนน้ำเสียเข้าระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง หรือการเปลี่ยนคุณสมบัติของน้ำเสียที่เข้าระบบอย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม ระบบหมักตัวกลางกรองก็มีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับระบบหมักแอนแนโรบิกคอนแทค ที่สำคัญคือ ระบบหมักตัวกลางกรองมีค่าก่อสร้างสูงมาก เนื่องจากตัวกลางพลาสติกมีราคาสูง

2.2.3 ระบบหมักยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket; UASB)

เป็นระบบหมักที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ และในปัจจุบันได้รับความนิยมในการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี (สุเมธ ชวเดช, 2530) คือ

น้ำเสียถูกสูบเข้าสู่ถังหมักทางด้านล่างที่ความเร็วที่เหมาะสม ในถังหมักจะมีชั้นตะกอนแบคทีเรียสองชั้น ชั้นล่างส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิดเม็ด (granular bacteria) เรียกว่า Sludge bed ส่วนในชั้นที่สองเป็นชั้นของตะกอนเบา (flocculant bacteria) เรียกว่า Sludge blanket สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายไปเรื่อย ๆ เมื่อผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรียเหล่านี้ ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการกวนผสมอย่างรุนแรงในถังหมัก เพื่อให้น้ำเสียและตะกอนแบคทีเรียสัมผัสกัน แต่อาจใช้การกวนเป็นครั้งคราวหรือการกวนเบา ๆ แทน ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดการกวนผสมกันอยู่แล้ว

กลุ่มตะกอนแบคทีเรียในถังหมักจะถูกทำให้เกิดการฟุ้งกระจายโดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยก๊าซที่เกิดขึ้นจะลอยผ่านกรวยแยกและถูกแยกออกไปสู่ส่วนเก็บก๊าซทางด้านบนของถังหมัก ส่วนตะกอนที่ฟุ้งกระจายขึ้นมา จะเกิดการรวมกลุ่มและจมตัวลงบริเวณกรวยแยก ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ส่วนบนของถังหมักนี้

การที่มีชั้น scum ที่ผิวหน้าของของเหลว ล้นผ่านกรวยแยกติดออกมากับน้ำที่ออกจากถังหมัก สามารถป้องกันได้โดยการติดครีบ (baffle) กั้นตรงส่วนทางออก

ในส่วนของกรวยแยกตะกอน ซึ่งเป็นส่วนที่แยกก๊าซและตะกอนออกจากกันนั้น เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของถังหมักยูเอเอสบี อนึ่งได้มีผู้เสนอให้ใช้เบดแน่นหรือ packed bed ที่ส่วนบนของถังหมักแทน ซึ่งแนวความคิดนี้ได้มาจากการนำเอาหลักการของระบบยูเอเอสบีรวมกับหลักการของระบบตัวกลางกรอง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกักเก็บตะกอนแบคทีเรียของระบบนี้ต่ำ และยังไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน เนื่องจากยากต่อการควบคุมและการออกแบบก่อสร้าง (Lettinga and Hulshoff, 1991)

2.2.4 ระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดเบด (Anaerobic Fluid Bed)

เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดระบบหนึ่งเนื่องจากสามารถควบคุมให้มีปริมาณแบคทีเรียในระบบสูงถึง 15,000-40,000 มก./ล. โดยแบคทีเรียในระบบจะเกาะเป็นเมือกคลุมผิวตัวกลางที่เป็นเม็ดขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 มม.) โดยน้ำเสียจะถูกสูบเข้าถังหมักทางด้านล่างด้วยความเร็วที่พอเหมาะที่จะยกเม็ดตัวกลางให้ลอยได้ การเคลื่อนที่ของเม็ดตัวกลางมากมายเหล่านี้จะเหมือนการเคลื่อนที่ของของเหลว คือเคลื่อนที่ไปทุกทิศทุกทาง จึงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลทั้งอาหารและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากปฏิกิริยาชีวเคมีสูงมาก ส่วนบนของถังหมักจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่กว้างขึ้น ดังนั้นความเร็วของของเหลวในช่วงบนนี้จะต่ำลง จึงทำให้เม็ดตัวกลางที่มีเมือกแบคทีเรียเกาะอยู่ตกลงมา เฉพาะส่วนน้ำใสเท่านั้นที่จะไหลออกจากถังหมัก เนื่องจากเม็ดตัวกลางเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระ ดังนั้นจึงเกิดการขัดสีและชนกันตลอดเวลา ทำให้เมือกแบคทีเรียบางส่วนหลุดออกไป จึงเป็นการควบคุมความหนาของเมือกแบคทีเรีย ส่วนของแบคทีเรียที่หลุดติดออกไปกับน้ำเสียที่ออกจากระบบ จะแยกออกโดยผ่านถังตกตะกอนก่อน

2.3 การเกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรีย (Granulation Process)

ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ ขึ้นอยู่กับปริมาณแบคทีเรียในระบบ เมื่อมีปริมาณแบคทีเรียสูง ประสิทธิภาพของระบบก็สูงด้วย ในการทำให้ระบบหมักยูเอเอสบีมีปริมาณแบคทีเรียสูงได้ จำเป็นต้องทำให้เกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดมีความถ่วงจำเพาะสูง ทำให้จมตัวดี สามารถอยู่ในถังหมักได้ ในกรณีที่มีตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดอยู่แล้ว การเริ่มต้นการทำงานของระบบจะไม่ยุ่งยากมากนัก แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่สามารถหาตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดได้ ดังนั้นการเริ่มต้นเดินระบบจึงเริ่มต้นโดยใช้ตะกอนแบคทีเรียจากระบบอื่น ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนเบา (flocculant) กระบวนการเปลี่ยนแปลงจากตะกอนเบาเป็นตะกอนเม็ด แบ่งได้เป็น 3 ระยะดังนี้ (สุเมธ ชวเดช, 2530)

2.3.1 Wash-Out Stage เป็นช่วงแรกของกระบวนการเปลี่ยนแปลง จำเป็นที่จะต้องใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำ ๆ คือ น้อยกว่า 2 กก.ซีโอดี/$ม^3$.วัน ในช่วงนี้จะมีการ

สูญเสียตะกอนขนาดเล็กซึ่งเบาออกไปกับน้ำที่ล้นออกจากระบบตลอดเวลา

2.3.2 Transition Stage เป็นช่วงที่เริ่มเกิดแบคทีเรียชนิดเม็ด (granular bacteria) แต่ยังมีจำนวนน้อยและมีขนาดเล็ก อัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นกว่าในช่วง wash-out มีการเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้น ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวพาตะกอนแบคทีเรียที่เบาออกจากระบบมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีทำให้กลุ่มแบคทีเรียเม็ดสามารถเติบโตเพิ่มจำนวนได้มากขึ้นแต่ข้อสำคัญ คือ ต้องไม่ให้อัตราการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียชนิดเบาสูงกว่าอัตราการผลิตแบคทีเรียชนิดเม็ด มิฉะนั้นระบบจะล้มเหลวได้

2.3.3 Progressive Granulation Stage เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดและปริมาณของแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังหมัก ในช่วงนี้ระบบจะมีความสามารถรับการเพิ่มของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูง และรวดเร็วขึ้นกว่าระยะอื่น ๆ

การเกิดตะกอนเม็ดจะเริ่มจากนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนจำกัดในระยะแรก นิวเคลียสเหล่านี้ประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเฉื่อย ทำหน้าที่เป็นตัวยึด (supporting material) ซึ่งทำให้แบคทีเรียมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้นจึงไม่ถูกพาออกไปจากถังหมัก (wash out) เมื่อมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกมาจากเมือกหรือกลุ่มตะกอน ซึ่งตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกมาเนื่องจากตะกอนเม็ดถูกรบกวนนี้ จะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสชุดที่ 2 (secondary nuclei) ในการเติบโตของตะกอนเม็ด นิวเคลียสชุดที่ 2 จะเติบโตและสร้างนิวเคลียสชุดที่ 3 ในทำนองเดียวกัน ตะกอนเม็ดที่เกิดขึ้นในระยะแรกประกอบด้วยกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่จับตัวกันหลวม ๆ แต่จะค่อย ๆ อัดตัวแน่นเข้า เนื่องจากการเติบโตมิได้จำกัดอยู่แต่เฉพาะที่ผิวนอกของกลุ่มตะกอนเท่านั้น ยังเกิดการเจริญเติบโตภายในด้วย (Lettinga and Hulshoff, 1991)

Lettinga และ Hulshoff (1991) ได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างตะกอนเม็ดในระบบยูเอเอสบี ดังนี้

(ก) ตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้น (seeding sludge)

1. การมีแกนหรือตัวพา (carrier material) ที่เหมาะสมเพื่อให้แบคทีเรียเกาะ จำเป็นมากในตอนเริ่มต้น และยังช่วยกระตุ้นให้เกิดการรวมกลุ่มของแบคทีเรียอีกด้วย

2. ตะกอนแบคทีเรียที่หนาแน่นมีความเหมาะสมกว่าแบบเจือจาง ถึงแม้จะมี

ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำกว่าในการใช้เริ่มต้นเดินระบบก็ตาม

3. การเติมตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดลงไปเล็กน้อยในตะกอนแบคทีเรียที่ใส่เข้าไปในระบบ จะช่วยให้เกิดกระบวนการสร้างตะกอนเม็ดได้รวดเร็วขึ้น

(ข) ลักษณะการทำงานของระบบในการบำบัดน้ำเสีย

ควรจะมีการทำให้ตะกอนแบคทีเรียที่เบาหลุดออกจากถังหมักอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาตะกอนส่วนที่หนักเอาไว้และเพื่อช่วยให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียใหม่ในส่วนของแบคทีเรียที่คงอยู่ในถังหมักอีกด้วย ซึ่งมีข้อแนะนำดังต่อไปนี้

1. ไม่ควรนำเอาตะกอนแบคทีเรียที่เบาซึ่งถูก wash-out ออกจากถังหมักแล้วกลับมาใช้ใหม่

2. นำน้ำเสียที่ผ่านออกจากระบบแล้วกลับมารีไซเคิล หรือใช้ในการเจือจางน้ำเสียขาเข้าระบบที่มีค่า COD สูงกว่า 5,000 มก./ล.

3. เพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นไปเรื่อย ๆ ซึ่งมักจะทำหลังจากที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ (COD reduction) ได้อย่างน้อย 80 %

4. รักษาความเข้มข้นของอะซิเตตให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 1,000 มก./ล.

5. เริ่มต้นระบบด้วยชั้นตะกอนบาง คือ 12-15 กก.VSS / $ม^3$. หรือต่ำกว่า 40 กก.TSS / $ม^3$.

(ค) คุณลักษณะของน้ำเสีย

1. ความเข้มข้น (strength) ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จะเกิดแบคทีเรียชนิดเม็ดได้เร็วกว่า อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของน้ำเสียไม่ควรต่ำเกินไป ควรมีปริมาณสารอินทรีย์ที่พอเหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรีย ระดับค่า COD ไม่ควรต่ำกว่า 1,000 มก./ล.

2. สารพิษ และสารแขวนลอยต่าง ๆ เป็นตัวหน่วงหรือขัดขวางการเกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด

3. องค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อการสร้างตะกอนเม็ด ได้แก่

- ในน้ำเสียที่มีสารอาหารเป็นพวกคาร์โบไฮเดรต จะทำให้เกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดได้เร็วกว่าในน้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะในสภาวะ

อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิสูง (thermophilic)

4. ความเข้มข้นของอิออน (เช่น Ca^{++}, Mg^{++}) สูง จะทำให้เกิดการตกตะกอนทางเคมี (ได้เป็น $CaCO_3$, $CaHPO_4$, $MgNH_4PO_4$) เป็นผลให้ตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณเถ้าสูง เนื่องจากมีปริมาณสารอนินทรีย์ปนอยู่สูง

(ง) ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม

1. อุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 38-40 °ซในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic) และ 50-60 °ซ ในช่วงอุณหภูมิสูง (thermophilic)

2. pH ควรทำให้ pH ในถังหมักมีค่ามากกว่า 6.2 เสมอ

3. ปริมาณธาตุอาหารเสริมหลัก ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, ซัลเฟอร์ และธาตุอาหารเสริมอื่น ๆ (เช่น เหล็ก, นิเกิล, โคบอลท์) ควรจะมีอยู่ในปริมาณที่เพียงพอและอยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้ได้

4. ไม่ควรมีสารประกอบเป็นพิษอยู่ในระบบในปริมาณที่สูงเกินไป หรืออาจให้เวลาอย่างเพียงพอในการที่แบคทีเรียจะปรับตัวให้คุ้นเคยกับสภาวะต่าง ๆ ในระบบ

2.4 การเริ่มต้นการทำงานของระบบหมัก (Start-up)

การเริ่มต้นการทำงานของระบบในช่วงแรกจะช้า เนื่องจากอัตราการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต้องใช้เวลานาน ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเฉพาะในกรณีของระบบยูเอเอสบี และ ฟลูอิดเบด ซึ่งระยะเริ่มต้นการทำงานของระบบ (first start-up) นั้นระบบค่อนข้างเปราะบางและต้องใช้เวลานานกว่าจะเกิดตะกอนเม็ด แต่เมื่อผ่านระยะการเริ่มต้นระบบแล้ว ตะกอนแบคทีเรียที่ได้นั้นสามารถเก็บไว้ได้นาน ๆ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีสิ่งปนเปื้อน (Lettinga and Hulshoff, 1991)

ดังนั้นเพื่อไม่ให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบน้อยเกินไป เนื่องจากถูก wash-out ในช่วงเริ่มต้น จึงควรใช้ตะกอนแบคทีเรียในปริมาณที่มากเกินพอ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ในระบบจะมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่พอเหมาะแล้ว แต่เมื่อมีการเปลี่ยนองค์ประกอบหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นผลให้แบคทีเรียต้องมีการปรับตัวอีกครั้ง (secondary

start-up) ในกรณีนี้ต้องใช้ตะกอนแบคทีเรียปริมาณมากเกินพอเช่นเดียวกัน ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในช่วงของการที่แบคทีเรียปรับตัว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงที่แบคทีเรียมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพของน้ำเสียใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยนองค์ประกอบ และ/หรือความเข้มข้น รวมทั้งมาตรการแก้ไข (Lettinga and Hulshoff, 1991)

ลักษณะที่เกิดขึ้น	ชนิดของน้ำเสีย/สภาวะ	มาตรการแก้ไข
การมีเมือกมาเกาะติดบนตะกอนเม็ดเป็นปริมาณมาก	น้ำเสียที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ	ทำให้เกิดกระบวนการสร้างกรดก่อนในน้ำเสียที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ (pre-acidification) ; ใช้ sludge load ปานกลาง
ตะกอนเม็ดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่จะลอยตัว	น้ำเสียที่มีโปรตีน, กรดอะมิโน หรือไขมันเป็นองค์ประกอบ หรือในสภาวะของถังหมักเป็น micro-aerophilic	ทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการสร้างกรด ร่วมกับการจมตัวของของแข็ง ; ไม่ให้อากาศเข้าไปในระบบ ; ใช้ sludge load ปานกลาง
การเติบโตของตะกอนเม็ดใหม่ไม่เพียงพอ	การขาดสารอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโต	เติมสารอาหารที่จำเป็นและธาตุอาหารเสริมอื่น ๆ

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ลักษณะที่เกิดขึ้น	ชนิดของน้ำเสีย/สภาวะ	มาตรการแก้ไข
การสึกกร่อนของเม็ดตะกอน	น้ำเสียชนิดต่าง ๆ	ลดความเครียด (stress) บนเม็ดตะกอนโดยการลดอัตราการป้อนน้ำเสียหรือก๊าซที่เกิดขึ้น (gas load)
ตะกอนเม็ดมีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง	มีสารยับยั้งหรือสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำเสีย	กำจัดสารที่เป็นพิษออกจากน้ำเสีย ; เจือจางน้ำเสีย ; ให้เวลาในการปรับตัวของแบคทีเรียในตะกอนเม็ด ; ในกรณีที่ความเป็นพิษขึ้นกับค่า pH ควรปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม
เกิดการตกตะกอนทางเคมีบนตะกอนเม็ดหรือในตะกอนเม็ด	น้ำเสียที่มีอิออน เช่น Ca^{++} สูง	ลดความเข้มข้นของ Ca^{++} ในน้ำเสีย; เพิ่มขั้นตอนการตกตะกอนก่อนป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ

2.5 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง

ถึงแม้ว่า ในระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงจะได้มีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียในระบบแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากอัตราการเติบโตของแบคทีเรียยังต่ำอยู่ ทำให้ต้องใช้ระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic Retention Time; HRT) นาน ขนาดถังหมักใหญ่ ซึ่งทำให้ค่าก่อสร้าง

ระบบสูงด้วย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องอัตราการเติบโตของแบคทีเรียต่ำ ในที่นี้จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ไขไว้ 2 ทางด้วยกัน คือ การแยกวัฏภาคในการเกิดปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน และการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น (50-60 °ซ)

2.5.1 <u>การแยกการเกิดปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน</u> (Two-Stage Process)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ ไฮโดรไลซิส, การสร้างกรดอินทรีย์ และการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนนั้นต่ำกว่าในอีก 2 ขั้นตอน ดังนั้นอัตราการเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่ว ๆ ไป จึงขึ้นกับตอนการสร้างก๊าซมีเทน (แต่ในกรณีของน้ำเสียที่มีสารประกอบพวกเซลลูโลส (cellulose) สูง พบว่าขั้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย) โดยทั่วไป ในระบบบำบัดแบบดั้งเดิมและแบบประสิทธิภาพสูง มักใช้ถังหมักเพียงถังเดียว ซึ่งปฏิกิริยาชีวเคมีทั้งสามขั้นตอนเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันในถังหมักที่มีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่ำกว่าแบคทีเรียในกลุ่มอื่น อีกทั้งยังมีอัตราการเติบโตที่ต่ำกว่า เป็นผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบหมักแบบสองขั้นตอนขึ้น

หลักการทำงานของระบบ คือ ใช้ถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกัน โดยมีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้ในถังหมักแรก เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิส และการสร้างกรดอินทรีย์ ส่วนในถังหมักที่สอง เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสม และอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนแตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ถังหมักสองถังทำให้สามารถควบคุมสภาวะและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้ (Sumaeth, 1988)

<u>ข้อดีข้อเสียของระบบหมักแบบสองขั้นตอน</u>

ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน มีข้อดีเหนือกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวดังนี้ (Ghosh, Conrad, and Klass, 1975)

- สามารถปรับสภาวะภายในถังหมัก ให้เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียในแต่ละ

กลุ่มได้

- ช่วยลดขนาดของถังหมัก ซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและในการทำงานลงได้

- อัตราการย่อยสลายสูงขึ้น ทำให้อัตราการผลิตและปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย

- ลดปริมาณความร้อนที่ต้องการ และเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อน (thermal efficiency)

- ลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียที่ออกจากระบบ โดยมีการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายไนเตรต และ liquefaction ในน้ำเสียที่เข้าระบบในถังหมักกรด (Ghosh and Klass, 1977)

ข้อเสียของระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน คือ ต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุม และต้องเพิ่มเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวัดและควบคุมระบบเข้ามา จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบไม่แตกต่างจากระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงนัก

เทคนิคในการแยกออกเป็นสองขั้นตอน

จุดประสงค์ในการแยกออกเป็นวัฏภาคการสร้างกรดอินทรีย์ และวัฏภาคการสร้างก๊าซมีเทน เพื่อให้มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทนในปริมาณที่พอเหมาะในถังหมักแต่ละถัง เพื่อให้อัตราการสร้างกรดและการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยการควบคุมถังหมักแต่ละถังแยกจากกัน อย่างไรก็ตาม ในถังหมักกรดก็ยังมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอยู่และในทางกลับกันในถังหมักมีเทน ยังคงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดร่วมอยู่ด้วย แต่มิได้เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนตามลำดับ

การแยกออกเป็นสองขั้นตอนสามารถทำได้โดย (Ghosh, Conrad, and Klass, 1975)

- ใช้เยื่อไดอาไลซิส (Dialysis membrane) ซึ่งจะเลือกให้เฉพาะแบคทีเรียบางชนิดเท่านั้นที่ผ่านเยื่อไปได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและเยื่อที่ใช้มีราคาแพงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้

- ใช้ตัวยับยั้งที่เหมาะสม สำหรับยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ตัวยับยั้ง ได้แก่ ออกซิเจน, ไนเตรต, ซัลเฟต หรือโลหะ แต่เนื่องจากการหาตัวยับยั้งและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมนั้นทำได้ยาก จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เช่นกัน

- ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูง ๆ ซึ่งจะทำให้มีปริมาณกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid; VFA) สูง มีผลในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักกรดโดยตรง

- การควบคุมทางจลนพลศาสตร์ (kinetic control) เป็นการควบคุมการทำงานของถังหมักที่อัตราการเจือจาง (dilution rate) และอัตราส่วนการรีไซเคิล (recycle ratio) ซึ่งมักจะใช้อัตราการเจือจางในถังหมักกรดสูง (หรือใช้ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียในถังหมัก (HRT) ต่ำ) เพื่อทำให้ในถังหมักกรดมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ยาวนานกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและมีการนำเอาตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักแต่ละถังกลับไปใช้อีก เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในถังหมัก

เทคนิคที่เหมาะสมที่สุด คือ การควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยการใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในถังหมักกรดสูง (HRT ต่ำ) ส่วนในถังหมักมีเทนนั้นให้ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่าในถังหมักกรด (HRT ยาวนานกว่า)

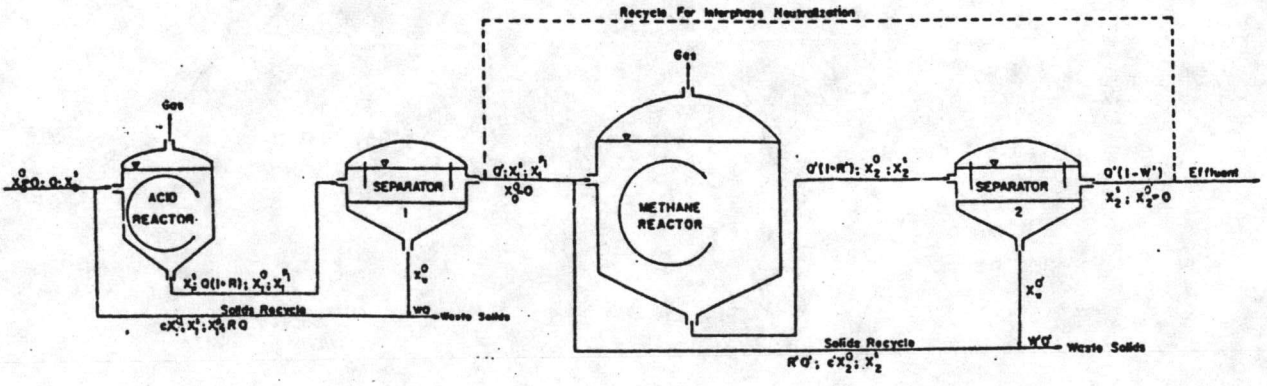
<u>ลักษณะการทำงานของระบบ</u>

เนื่องจากความแตกต่างในลักษณะการเติบโต, อาหารที่ต้องการ และสภาวะในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน จึงทำให้ต้องมีการแยกการย่อยสลายออกเป็น 2 ขั้นตอน ในระบบประกอบด้วย ถังหมักจำนวน 2 ถังต่ออนุกรมกัน โดยในแต่ละถังหมักจะมีการกวนผสมอย่างดี และมีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ รวมทั้งอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้เหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม เพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยในถังหมักแรก หรือถังหมักกรด จะควบคุมสภาวะให้เหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด เกิดการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์ ได้กรดไขมันระเหย (VFA) เป็น

I16796123

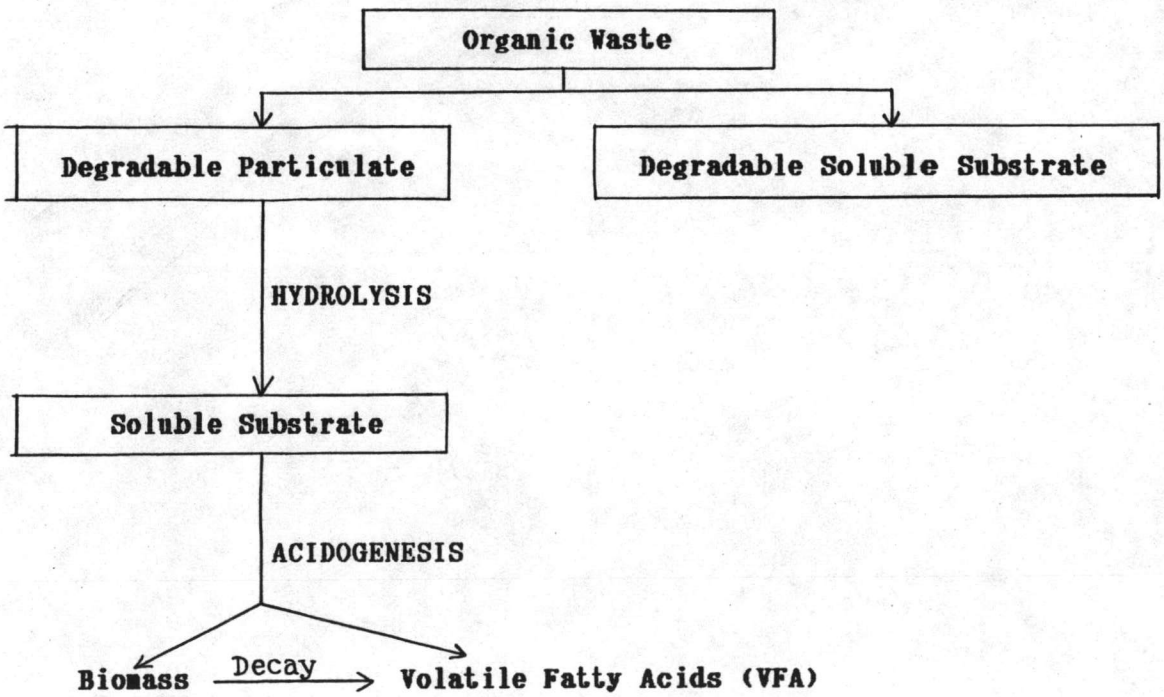
ผลิตภัณฑ์ ส่วนในถังหมักสอง หรือ ถังหมักมีเทน (มีขนาดใหญ่กว่าถังหมักกรด) มีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยใช้กรดไขมันระเหยจากถังหมักกรดเป็นอาหารของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วย มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ ตะกอนแบคทีเรียที่ออกจากถังหมักแต่ละถัง จะถูกนำกลับมาใช้ในถังหมักอีก เช่นเดียวกับใน Contact Process ขนาดของถังหมักและอัตราส่วนการรีไซเคิลสำหรับแต่ละขั้นตอนขึ้นกับจลนพลศาสตร์ในการเติบโต (growth rate) ของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบระบบหมักแบบสองขั้นตอน

เนื่องจากในขั้นตอนแรกได้กรดไขมันระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ ในบางครั้งจึงจำเป็นต้องมีการควบคุม pH ในถังหมักมีเทน มิฉะนั้นถ้า pH ต่ำเกินไปจะมีผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนได้ การควบคุม pH สามารถทำได้โดยการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (influent) หรือการนำน้ำเสียที่ออกจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิล อย่างไรก็ตาม การปรับ pH โดยการเติมสารเคมีนั้นไม่ค่อยเหมาะสม เพราะนอกจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีแล้ว ยังอาจทำให้ pH ของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนสูงเกินไป ซึ่งมีผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.6 ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนชนิดสองขั้นตอน (Pohland and Ghosh, 1971)

ถังหมักกรด เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์เป็นสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ คือ กรดไขมันระเหย ซึ่งองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยที่ได้นั้นขึ้นกับสภาวะในการทำงาน โดยทั่วไปกรดไขมันระเหยที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ประกอบด้วย กรดอะซิติก (acetic acid), กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก (butyric acid) เป็นส่วนใหญ่ และมีกรดไขมันระเหยมวลโมเลกุลสูงอื่น ๆ เช่น กรดวัลเลอริก (valeric acid) และกรดคาร์โปรอิก (carproic acid) บ้างเล็กน้อย ในขั้นตอนการหมักกรดนั้นจะมีประสิทธิภาพดีก็ต่อเมื่อ ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนถูกยับยั้ง โดยการใช้ระยะเวลากักเก็บสั้น และอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูง ๆ การลดระยะเวลากักเก็บลงจะเป็นผลให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยที่มีมวลโมเลกุลสูงในผลิตภัณฑ์สูงขึ้นด้วย (Sumeth, 1988) ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง อย่างไรก็ตามแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดสามารถทนสภาพที่ pH ต่ำ ๆ (pH ประมาณ 5) ได้ โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงในถังหมักกรด (Sumaeth, 1988)

<u>ถังหมักมีเทน</u> เกิดปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งมีปฏิกิริยาหลัก ๆ อยู่ 2 ปฏิกิริยา คือ เกิดจากปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์จากถังหมักกรดกับแบคทีเรีย ได้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ได้ก๊าซมีเทนและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนนั้นช้ากว่าในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์มาก ในการทำงานจึงต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่กว่า, ระยะเวลากักเก็บนานกว่าในถังหมักกรด ปฏิกิริยาต่าง ๆ ในถังหมักมีเทนสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นก๊าซซึ่งจะถูกดึงออกจากถังหมักตลอดเวลา สำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักมีเทนนั้น ควรใช้แบคทีเรียหลายชนิดรวมกัน (mixed culture) เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่แตกต่างกัน เช่น ในกรณีของการย่อยสลายกรดวัลเลอริก ต้องใช้แบคทีเรีย 3 ชนิดคือ *Mb. Suboxydans* สำหรับออกซิไดซ์กรดวัลเลอริกเป็นกรดอะซิติกและโพรพิโอนิก ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายต่อได้โดยแบคทีเรียชนิดนี้, *Mb. Propionicum* ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกเป็นกรดอะซิติก, คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน และ *Methanosarcina Methanica* ทำหน้าที่ในการย่อยสลายกรดอะซิติก เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH มาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางเสมอ นอกจากนี้การทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนยังสามารถถูกยับยั้งได้ เมื่อมีการสะสมของกรดไขมันระเหยเป็นปริมาณมาก ทั้งนี้เนื่องจากกรดไขมันระเหยจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำย่อยของแบคทีเรีย (enzyme) ได้สารระหว่างปฏิกิริยา (intermediate product) เป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการ (Sumaeth, 1988)

$$S + E \rightleftharpoons SE \rightleftharpoons E + X + \text{product}$$

$$SE + S \rightleftharpoons SSE$$

เมื่อ S = สารอาหารในที่นี้คือ กรดไขมันระเหย

E = น้ำย่อยของแบคทีเรีย

X = ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนในสภาวะที่มีกรดไขมันระเหยต่ำ

การนำเอาระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนไปประยุกต์ใช้

จากการศึกษาวิจัยของ Ghosh และ Henry ในปี 1981 ซึ่งทำการเปรียบเทียบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบประสิทธิภาพสูง และระบบสองขั้นตอน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าระบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่า และใช้ระยะเวลากักเก็บต่ำกว่า ในขณะที่ใช้สิ่งป้อนที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (ดังแสดงในตารางที่ 2.6) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งสูง (solid waste) ที่ 9 ตัน/วัน นั้น พบว่าในระบบแบบสองขั้นตอนใช้ถังหมักขนาดเล็กกว่าถึง 3 เท่า และยังให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซมีเทนสุทธิสูงกว่าถึง 73 % (Klass, 1984)

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการทำงานของระบบประสิทธิภาพสูงและระบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มที่ 35 °ซ โดยในระบบประสิทธิภาพสูงใช้ถังหมักแบบ CSTR ขนาด 7 ลิตร และในระบบสองขั้นตอนใช้ถังหมักแบบ CSTR ขนาด 2.5 ลิตร ต่ออนุกรมกับถังหมักแบบตัวกลางกรองขนาด 5.5 ลิตร (Klass, 1984)

Datum	High-rate	Two-phase
Loading, kg VS/m^3-day	0.64	4.8
Retention time, days	15	7.4
Methane yield, m^3(n) per kilogram of VS added	0.37	0.37
Gas production rate, volume (n)/liquid volume-day	0.39	2.74
Gas composition, mole percent		
Methane	61	63
Hydrogen	0	3
Volatile solids reduction, percent	72	64
COD reduction, percent	84	96
Feed energy in gas, percent	76	75

นอกจากนี้ Ghosh และ Klass (1977) ยังได้เสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซในระบบสองขั้นตอนไว้ดังนี้

- การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสิ่งป้อนในขั้นไฮโดรไลซิสก่อนป้อนเข้าสู่ถังหมักกรด
- การแยกเอาก๊าซที่เกิดขึ้นออกจากระบบตลอดเวลาเพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซอย่างต่อเนื่อง
- การแยกองค์ประกอบก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกัน โดยนำส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับเข้าสู่ถังหมักมีเทนอีก เพื่อผลในการเกิดปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน (Methanation) และการกวนผสมในถังหมัก
- การนำเอาน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมารีไซเคิลเข้าสู่ถังหมักกรดอีกเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา denitrification และเป็นการลดปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย
- การใช้ถังหมักมีเทนมากกว่า 1 ตัวต่ออนุกรมกัน ซึ่งในแต่ละถังจะเตรียมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนแต่ละชนิด เนื่องจากข้อจำกัดในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ดังได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้เกิดการย่อยสลายกรดอินทรีย์ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2.5.2 การทำงานในช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic Range) 50-60 °ซ

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางชีวเคมีโดยทั่วไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญประการหนึ่ง คือ อุณหภูมิ พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ (Lier, 1991) โดยทั่วไปมักนิยมควบคุมอุณหภูมิในถังหมักให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 35-37 °ซ) เนื่องจากในช่วงนี้มีอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำ (5-15 °ซ) และไม่ต้องใช้พลังงานสูงมากในการให้ความร้อนและการควบคุมเหมือนในช่วงอุณหภูมิสูง (50-60 °ซ) แต่อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิสูงก็มีข้อดีเหนือกว่าในช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ คือ (Buhr and Andrew, 1977; Lier, 1991)

- เพิ่มอัตราเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยทั่วไปอัตราการเติบโตที่ 55 °ซ จะมากกว่าที่ 30 °ซ ถึง 2-3 เท่า ทำให้ใช้เวลาในการกักเก็บลดลง ขนาดถังหมักลดลง ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบลงได้

- เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในส่วนที่เป็นของแข็ง ทำให้ปริมาณของแข็งที่เหลือทิ้งจากระบบลดลง ในขณะเดียวกันก็ให้ก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย

- ในกรณีที่ต้องมีการดึงน้ำออกจากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแล้วก่อนจะนำไปผ่านขั้นตอนต่อไป หรือนำไปทิ้งนั้น สามารถทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเกิดการแยกระหว่างวัฏภาคของแข็งกับของเหลวได้ดีขึ้น

- ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่เป็นเชื้อโรคลงได้

- การกวนผสมทำได้ง่ายขึ้น และการจมตัวของตะกอนในระบบดีขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนืดของของเหลวลดลง

ปัญหาในการทำงานของระบบหมักที่อุณหภูมิสูง นอกจากจะต้องการพลังงานจำนวนมากเพื่อทำให้อุณหภูมิของระบบสูงถึง 50-60 °ซ ดังได้กล่าวมาแล้ว ข้อเสียอื่น ๆ ได้แก่ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีปริมาณสารละลายปนอยู่สูง, ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากระบบสูงขึ้น (ซึ่งปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นกับช่วงเวลาในการเริ่มต้นการทำงานของระบบ ถ้าใช้ช่วงเวลาเริ่มต้นนาน ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำที่ออกจากระบบหมักจะต่ำกว่า (Lier, 1991)) และปัญหาที่สำคัญที่สุด คือ เสถียรภาพของระบบหมัก (stability) ไม่ค่อยดี เนื่องจากความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม (pH, อุณหภูมิ, และอื่น ๆ) ของจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้ที่อุณหภูมิสูงจุลินทรีย์บางส่วนตายลง เป็นผลให้ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่าง ๆ ลดลง ซึ่งเมื่อเทียบกับการทำงานที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง พบว่าเสถียรภาพของระบบดีกว่าอุณหภูมิสูง (Buhr and Andrew, 1977)

การแก้ปัญหาสำหรับระบบบำบัดที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิสูง ในด้านพลังงานที่ใช้นั้นอาจทำได้โดยการใช้พลังงานทดแทนจากก๊าซที่ผลิตได้จากระบบ หรือการใช้น้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูงอยู่แล้ว เช่น น้ำเสียที่ได้จากหอกลั่นโรงงานผลิตสุรา ก็จะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนกับระบบลงได้ ส่วนปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบนั้น สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบมีเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพของน้ำเสียยาวนานขึ้น (Souza, Fuzaro, and Polegato, 1992)

การศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง Buhr และ Andrew (1977) ได้เสนอแบบจำลองเพื่ออธิบายคุณลักษณะของกระบวนการ

ย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งได้จากการทำสมดุลมวลสารในวัฏภาคชีวภาพ (biological phase), วัฏภาคของเหลว (liquid phase) และวัฏภาคก๊าซ (gas phase) โดยในแต่ละวัฏภาคมีองค์ประกอบดังนี้

วัฏภาคชีวภาพ : จุลินทรีย์ต่าง ๆ

วัฏภาคของเหลว : กรดอินทรีย์, ไบคาร์บอเนต และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ, แอมโมเนีย, อิออนบวกและอิออนลบอื่น ๆ และปริมาณสารพิษต่าง ๆ

วัฏภาคก๊าซ : ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

โดยให้ขั้นตอนการเปลี่ยนจากกรดอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็ว เกิดปฏิกิริยาภายใต้สมมติฐานคือ ไม่มีการยับยั้งจากปริมาณผลิตภัณฑ์ แบบจำลองนี้ใช้ได้ในช่วง pH ต่ำกว่า 8 และไม่คิดการตกตะกอนหรือการละลายของสารเคมีที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาโดยแอมโมเนียที่ไม่แตกตัว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังในรูปที่ 2.8 และตารางที่ 2.7 แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณ

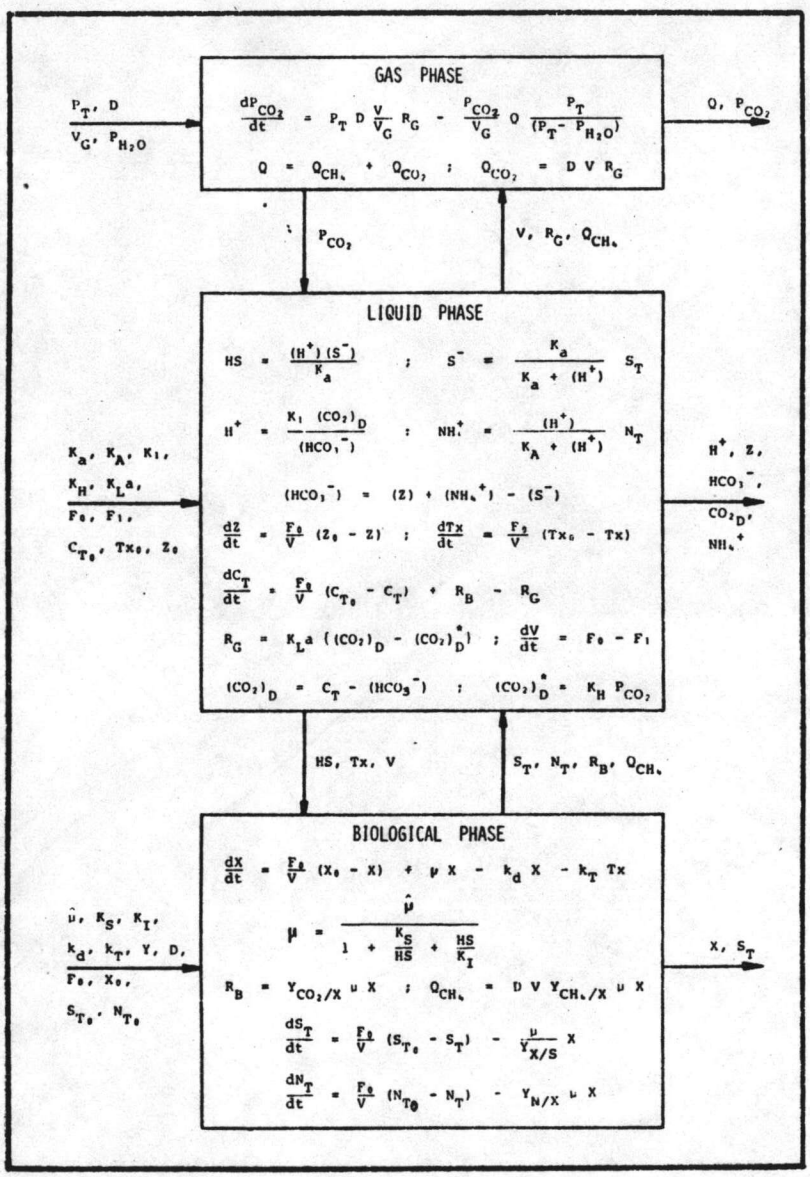
1. <u>อุณหภูมิกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย</u>

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียนั้นมี 3 ช่วง คือ

- ช่วงอุณหภูมิต่ำ (psychrophilic range) 5-15 °ซ
- ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic range) 35-37 °ซ
- ช่วงอุณหภูมิสูง (thermophilic range) 50-60 °ซ

ซึ่งแต่ละช่วงอุณหภูมิก็มีกลุ่มแบคทีเรียที่แตกต่างกันออกไป สำหรับแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิสูง (thermophilic bacteria) นั้นแบ่งตามช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตได้เป็น 3 ประเภท คือ (Lier, 1991)

- Thermotolerant หรือ Subthermophilic อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโต คือ 45-50 °ซ
- Thermophilic อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโต คือ 55 °ซ ขึ้นไป
- Caldoactive หรือ Hyperthermophilic อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโต คือ 70-80 °ซ

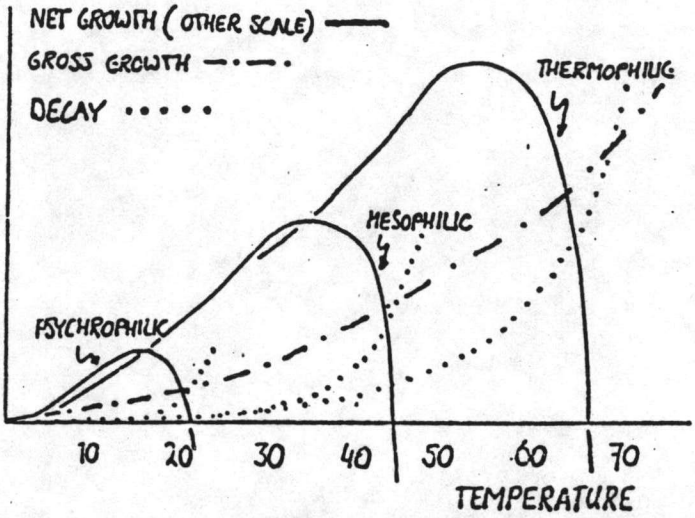


รูปที่ 2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Buhr and Andrew, 1977)

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Buhr and Andrew, 1977)

	Reference
$Y_{X/S}$ = 0.0227 mole X/mole substrate converted	Lawrence & McCarty, 1965
$Y_{N/X}$ = 1.0 mole NH_3 consumed/mole X produced	Equation 2
$Y_{CO_2/X}$ = 37.4 mole CO_2/mole X produced	See text
$Y_{CH_4/X}$ = 45.7 mole CH_4/mole X produced	See text
k_T = not used	
$K_s = 1 \times 10^{-4}$ mole l^{-1}	Simulations
$K_I = 6.67 \times 10^{-4}$ mole l^{-1}	Simulations
$\hat{\mu} = 0.324 \exp\{0.06(\theta - 35)\}$ days^{-1}	See text
$k_d = 0.02 \exp\{0.14(\theta - 35)\}$ days^{-1}	See text
D = 24 l mole^{-1} at 20°C and 1 atm	Ideal gas law
$P_{H_2O} = \exp\left\{12.0 - \frac{4014}{(\theta + 234.6)}\right\}$ atm	Perry, 1950*
$K_H = \exp\left\{-8.1403 + \frac{842.9}{(\theta + 151.5)}\right\}$ mole l^{-1} atm^{-1}	Lange, 1967* Stephen & Stephen, 1963*
$K_L a$ = 100 days^{-1}	Estimated
Dissociation constants:	
$K_a = 10^{(-pK_a + p\gamma + p\gamma_{H^+})}$	
$K_A = 10^{(-pK_A - p\gamma + p\gamma_{H^+})}$	
$K_1 = 10^{(-pK_1 + p\gamma + p\gamma_{H^+})}$	
where	
$pK_a = 1170.48/T - 3.1649 + 0.013399\,T$	Robinson & Stokes, 1959
$pK_A = 2835.76/T - 0.6322 + 0.001225\,T$	Robinson & Stokes, 1959
$pK_1 = 3404.71/T - 14.8435 + 0.032786\,T$	Robinson & Stokes, 1959
$p\gamma = A\zeta^2\left(\frac{\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}} - 0.2\,I\right)$	Butler, 1964
$p\gamma_{H^+} = A\zeta^2\left(\frac{\sqrt{I}}{1+9B\sqrt{I}}\right)$	Butler, 1964
$A = 1.825 \times 10^6 (\epsilon T)^{-1.5}$	Butler, 1964
$B = 50.3 (\epsilon T)^{-0.5}$	Butler, 1964
ϵ = Dielectric constant	Harned & Owen, 1958
$= 87.74 - 0.40008\,\theta + 9.398 \times 10^{-4}\theta^2 - 1.410 \times 10^{-6}\theta^3$	
ζ = Ionic valence = 1 (for ions considered here)	

* Least-squares fit of available data to Antoine equation.



รูปที่ 2.9 อุณหภูมิกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Lier, 1991)

การแบ่งชนิดของแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวดังนี้ ไม่ได้แยกจากกันอย่างชัดเจนนัก อาจถือได้ว่าแบคทีเรียที่เติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 45 °ซ ขึ้นไป เป็นแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิสูงทั้งหมด โดยแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิสูงเหล่านี้ไม่มีการเติบโต ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 °ซ

อัตราการเติบโตของแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิสูง จะสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิปานกลางและอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอัตราการเติบโตของแบคทีเรียในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสมการของ Arrhenius (Lier, 1991)

$$\text{Growth Rate} = Ae^{-(E/RT)}$$

เมื่อ A = ค่าคงที่

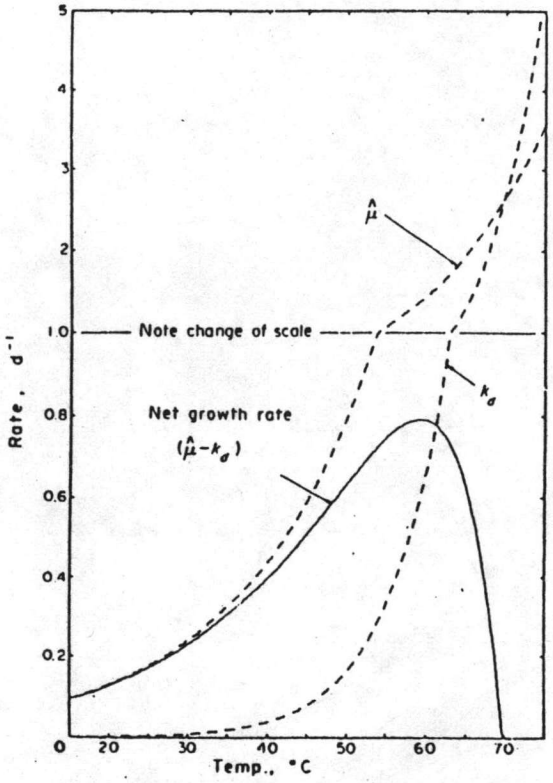
E = ค่าพลังงานกระตุ้น

= 15 Kcal/mol (Maly and Fadrus, 1971)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K)

อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละช่วง เช่น ในช่วงอุณหภูมิสูง อุณหภูมิสูงสุดคือ 60 °ซ อัตราการเจริญเติบโตจะตกลงอย่างรวดเร็ว (Buhr and Andrew, 1977) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

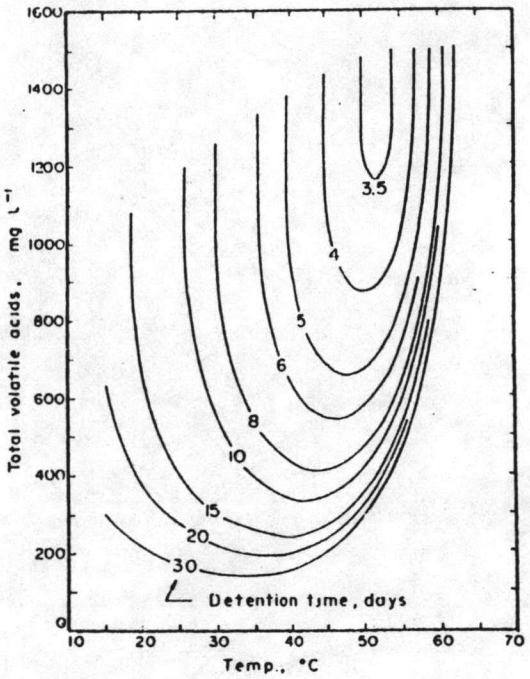


รูปที่ 2.10
การเปลี่ยนแปลงอัตราการเติบโตของแบคทีเรีย
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Buhr and Andrew, 1977)

2. <u>อุณหภูมิกับปริมาณกรดอินทรีย์ในระบบ</u>

รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดอินทรีย์กับอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว และภายใต้สภาวะที่มีการป้อนอย่างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่ามีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ 35 °ซ ที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน ซึ่งการที่มีปริมาณกรดอินทรีย์ต่ำนั่นหมายถึงว่าระบบมีเสถียรภาพสูง ถือว่าเป็นจุดเหมาะสมในการทำงานของระบบ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (HRT ต่ำลง) พบว่าจุดที่เหมาะสมจะอยู่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะเดียวกันปริมาณกรดอินทรีย์ต่ำสุดก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อระยะเวลากักเก็บลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงช่วงอุณหภูมิที่จำกัดสำหรับการทำงานของระบบหมักอีกด้วย โดยดูจากการที่ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนั่นเอง ดังนั้นในการควบคุมการทำงานของระบบหมักที่อุณหภูมิสูงนี้ต้องมีความระมัด

ระวังอย่างมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้การทำงานของระบบล้มเหลวได้



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดอินทรีย์กับอุณหภูมิที่สภาวะคงตัวภายใต้สภาวะที่มีการป้อนอย่างต่อเนื่อง (Buhr and Andrew, 1977)

3. อุณหภูมิกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนมากกว่าในขั้นตอนการสร้างกรด (Schroeder, 1977) โดยพบว่าที่ 60 °ซ ได้ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์มากกว่าที่ 25 °ซ ประมาณ 25 % (Fair and Moor, 1937)

4. อุณหภูมิกับสภาวะแวดล้อมภายนอก

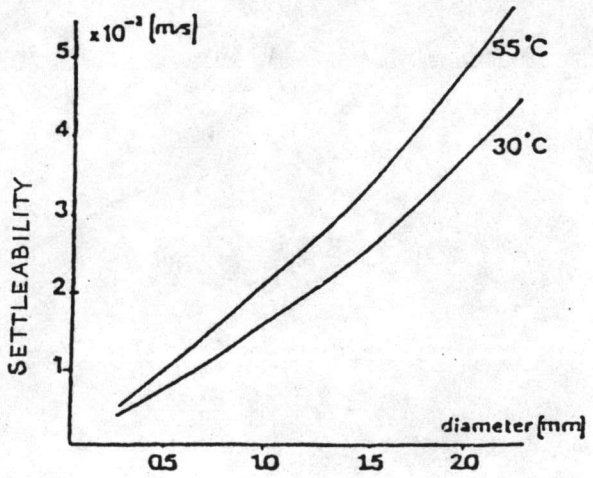
สภาวะแวดล้อมภายนอก ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำเสีย ซึ่งคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Lier, 1991) มีดังนี้

- ความหนืดของของเหลว (liquid viscosity) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดของของเหลวจะลดลง ทำให้การจมตัวของตะกอนในระบบเป็นไปได้ง่ายขึ้น ดัง

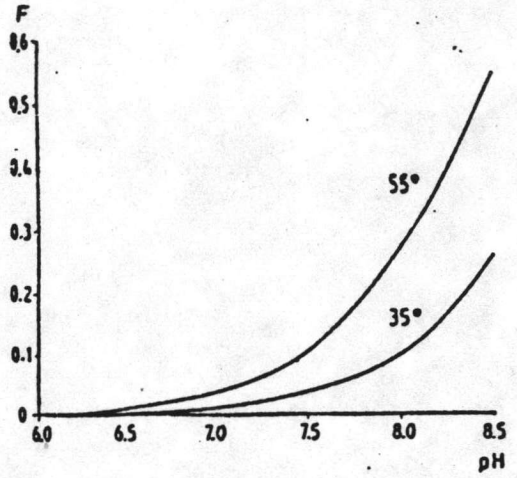
แสดงในรูปที่ 2.12

- ความสามารถในการละลาย (solubility) ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ลดลงนั่นหมายถึงว่าในน้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีมีเทนปนอยู่น้อยลง แต่ในขณะเดียวกันก๊าซไฮโดรเจน, แอมโมเนีย และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียในการย่อยสลายก็แยกตัวออกมาจากวัฏภาคของเหลวได้มากขึ้นเช่นกัน

- ค่าคงที่สมดุลเคมี (equilibrium constant) และค่าคงที่การละลาย (dissociation constant) ของเกลืออิออนต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือเกลืออิออนต่าง ๆ สามารถละลายในน้ำเสียได้ดีขึ้น รวมทั้งปริมาณของเกลืออิออนที่ไม่ละลายน้ำ เช่น กรดไขมันระเหย, แอมโมเนีย (NH_3), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก็เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งอาจเป็นพิษต่อระบบบำบัดได้โดยเฉพาะแอมโมเนีย ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและความเร็วในการจมตัวที่อุณหภูมิ 30 °ซ และ 55 °ซ (Lier, 1991)



รูปที่ 2.13 อัตราส่วนของแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ที่ค่า pH ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 35 °ซ และ 55 °ซ (Lier, 1991)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษาวิจัยและการนำเอาระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพมีมานานแล้ว และยังมีการศึกษาวิจัยกันมาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้น ในที่นี้จะได้กล่าวถึงงานวิจัยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวกับการใช้ระบบประสิทธิภาพสูง, ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน และระบบที่ควบคุมที่อุณหภูมิสูง

Ghosh และคณะ (1977)ได้ทำการศึกษาปรับปรุงระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น และทำการจดสิทธิบัตรไว้ด้วยในปี 1977 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองโดยใช้สิ่งปฏิกูลเป็นตะกอนแบบเร่ง สภาวะในการทดลองและผลที่ได้แสดงดังในตารางที่ 2.9 จากผลการทดลองที่รวบรวมได้พบว่า ระบบสองขั้นตอนให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ใช้เวลาในการกักเก็บลดลงเมื่อเทียบกับระบบขั้นตอนเดียว ซึ่งช่วยลดขนาดถังหมักลงได้ถึงประมาณ 3 เท่า (Sumaeth, 1988) และช่วยเพิ่มอัตราการรับสารอินทรีย์ของระบบอีกด้วย

ตารางที่ 2.8 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน (Ghosh et al., 1977)

(A) Operating condition	Acid phase	Methane phase
1. Feed	Activated sludge	Acid effluent
2. Mode of operation	Continuous	Daily, intermittent
3. Detention time (day)	0.5	6.5
4. Loading (lb organic/ ft^3.d)	1.5 to 2.7	0.2
5. Temperature (°C)	35	35
6. pH	5.7 to 5.9	7 to 7.2
(B) Performance	**Acid phase**	**Methane phase**
1. Total gas production (ft^3/ lb VS added)	0.02 to 0.3	5 to 6
2. Methane content (%)	19 to 44	70
3. Methane production ft^3/ lb VS added	0.0 to 0.1	3.5 to 4.2
4. Denitrification	High	Little
5. Predominant Volatile acid	Acitic acid	-

ตารางที่ 2.9 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนกับตะกอนแบบเร่ง (Ghosh et al., 1977)

Nature of Feed	Acid phase	Methane phase
1. Feed Consistency (%TS)	2 to 10	1 to 7
2. Temperature (°C)	20 to 40	20 to 40
3. Culturing Mode	Continuous	Intermittent or Continuous
4. Recycling (% of influent)	0 to 50*	0 to 40
5. Mixing	Continuous	Intermittent or Continuous
	Moderate Agitation	Gentle Agitation
6. Residence Time (d)	0.5 to 1.5	2 to 7
7. Loading (lb total organic/ ft^3. d)	1 to 10	0.1 to 0.5
8. pH	5 to 6	6.8 to 7.4

Breure และ Andel (1984) ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการสร้างกรดโดยแบคทีเรียแบบผสม (mixed culture bacteria) กับน้ำที่มีเจลาติน (โปรตีนชนิดหนึ่ง) เป็นสารอาหารหลัก เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของระบบและการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ที่อุณหภูมิ 30 °ซ พบว่า ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการเกิดไฮโดรไลซิสขึ้นกับทั้งค่า pH (เพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น) และอัตราเร็วในการเจือจาง (ลดลงเมื่ออัตราเร็วในการเจือจางเพิ่ม) ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดสำหรับโปรตีน อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง (pH >6.3) และอัตราการเจือจางสูงสุดคือ 0.23 ชม.$^{-1}$ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสร้างกรด คือ กรดไขมันระเหย (ได้แก่ กรดอะซิติก เป็นหลัก) และมีก๊าซเกิดขึ้นเล็กน้อย มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

จากผลการทดลองของ Breure และ Andel จะได้ว่า ถ้าสามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้เหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องแล้ว จะทำให้ระบบหมักแบบสองขั้นตอนนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Weber และคณะ (1984) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาชีวเคมีในแต่ละขั้นตอน โดยใช้อะซิเตตที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนกัมมันตภาพ ถังหมักที่ใช้เป็นแบบถังกวน เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 30 วัน ค่า pH ในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนอยู่ในช่วง 4.5-4.8 และ 7.0-7.8 ตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง 35 °ซ จากผลการทดลองพบว่าแบคทีเรียต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการปรับตัว แม้ว่าจะมีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ สารอาหาร และอัตราการไหล ให้คงที่ก็ตาม สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถังหมักกรดนั้นนอกจากจะได้กรดอินทรีย์แล้ว ยังได้ก๊าซชีวภาพอีกด้วย แสดงว่าในขั้นตอนการสร้างกรดนั้นมิได้มีแต่เฉพาะปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดเท่านั้น จากการทำสมดุลคาร์บอนพบคาร์บอนกัมมันตภาพทั้งในก๊าซผลิตภัณฑ์, ตะกอนแบคทีเรีย และในส่วนที่ wash out ด้วย และจากการทดลองหาค่าคงที่ของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (k) พบว่า การย่อยสลายอะซิเตตเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 แบบคู่ขนาน (parallel reaction) มีค่า k เท่ากับ 0.17 ชม.$^{-1}$ และ 0.50 ชม.$^{-1}$ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับค่า k ของระบบขั้นตอนเดียวคือ 0.17 ชม.$^{-1}$ และ 0.34

ชม.$^{-1}$ (Winter and Cooney, 1980) หรือ 0.015 ชม.$^{-1}$ และ 0.018 ชม.$^{-1}$ (Cooney and Wise, 1975) จะเห็นได้ว่าการแยกออกเป็น 2 ขั้นตอนทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายกรดอินทรีย์ดีขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน พบว่าการย่อยสลายอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนนั้น มี 2 ปฏิกิริยาที่เกิดควบคู่กันไป ดังนี้

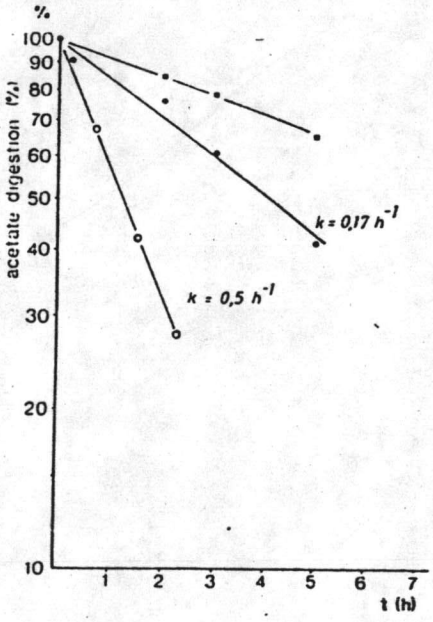
Machanism 1 $CH_3\text{-}COO^- + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3^-$

Machanism 2 $CH_3\text{-}COO^- + 4H_2O \longrightarrow 2HCO_3^- + 4H_2 + H^+$

$2H_2 + HCO_3^- \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + OH^-$

Balance $CH_3COOH + 2HO_2 \longrightarrow CH_4 + CO_2 + H_2O$

ซึ่ง 65-96 % ของก๊าซมีเทนทั้งหมดได้จากการย่อยสลายอะซิเตต



รูปที่ 2.14 ค่าคงที่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (k) การย่อยสลายอะซิเตต (Weber et al., 1984)

Ng, Wong และChin (1985) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีค่า COD ประมาณ 63,000 มก./ล. และประกอบด้วยส่วนที่ย่อยสลายยากสูง โดยใช้ระบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 32 °ซ ถังหมักที่ใช้เป็นแบบถังกวน 2 ถังต่ออนุกรมกัน ป้อนน้ำเสียแบบต่อเนื่อง และมีการควบคุมระยะเวลากักเก็บน้ำเสียในถังหมักทั้งสอง พบว่าแม้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดมีค่าสูงถึง 5,458 มก./ล. ก็ตาม แต่ไม่มีผลในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักทั้งสอง ค่า pH ของระบบเท่ากับ 7.2 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 85 % ที่ระยะเวลากักเก็บในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน 1 วันและ 30 วัน ตามลำดับ และจากการคำนวณระยะเวลาต่ำสุดที่แบคทีเรียใช้ในการเพิ่มจำนวนสำหรับถังหมักกรดและถังหมักมีเทน เท่ากับ 1.31 และ 2.48 วัน ตามลำดับ ซึ่งต่ำมากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในระบบขั้นตอนเดียว (15.3 วัน) ทำให้ถังหมักที่ใช้เล็กลงซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้

Lo และ Liao (1985) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จาก screened diary manure ซึ่งลักษณะต่าง ๆ ของระบบทั้งสองแสดงดังในตารางที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อแยกขั้นตอนการสร้างกรดออกจากขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนแล้ว ลักษณะต่าง ๆ ของระบบดีขึ้น รับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บลดลง ในขณะที่ให้ก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

Tanaka และ Mutsuo (1986) ทำการทดลองระบบหมักสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตนม (ค่า COD ประมาณ 1,500 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 37 °ซ โดยใช้ถังกวนขนาดความจุ 4.5 ลิตร เป็นถังหมักกรดและถังหมักแบบตัวกลางกรอง ขนาดความจุ 15 ลิตร ภายในบรรจุตัวกรองแบบพลาสติก เป็นถังหมักมีเทน มีการควบคุมระยะเวลากักเก็บน้ำเสียในถังหมักกรดให้ได้ 1.0 วัน ผลการทดลองพบว่า สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ถึง 93 % ที่ระยะเวลากักเก็บในระบบ 4.4 วัน ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ทั้งหมด 530 มล./ลิตรของสิ่งป้อน สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้เท่ากับ 80 % ค่า pH ของระบบอยู่ในช่วง 6.8–7.5 นอกจากนี้ระบบยังสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันได้สูงถึง

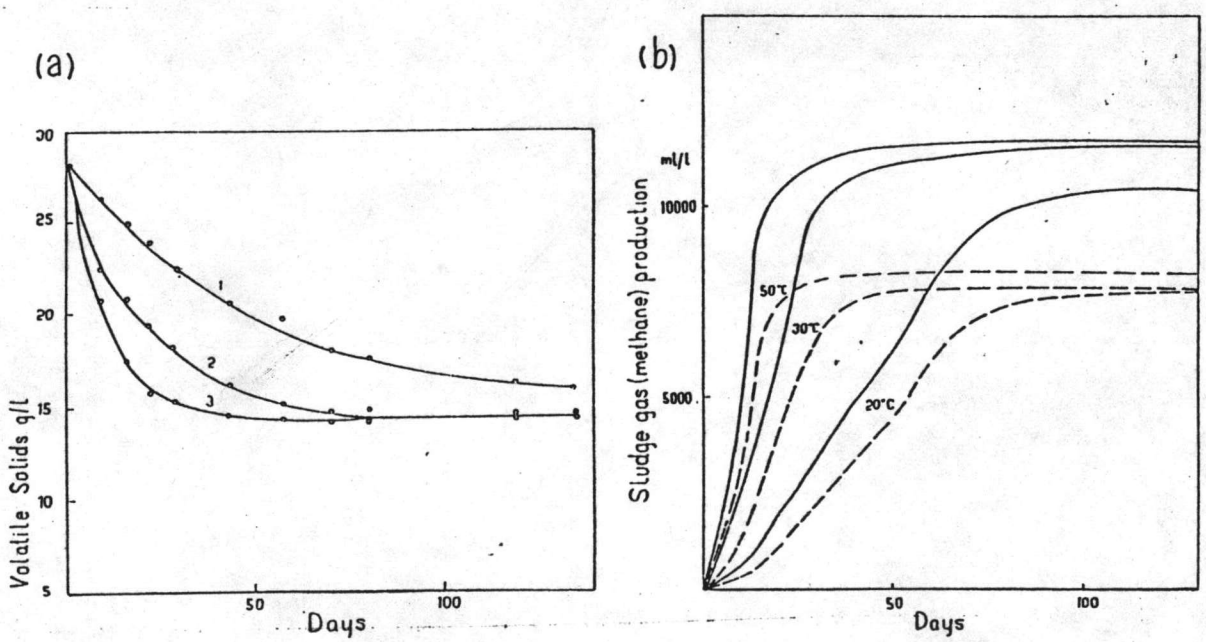
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบลักษณะของระบบขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจาก screened dairy manure (Lo and Liao, 1985)

Performance	Single-phase		Two-phase		
			Acid-phase	Methane-phase	Total
Digestor	Fixed-Film	Fixed-Film	Completely Mixed	Fixed-Film	
Loading rate (g VS/ l.d)	13.2	32.8	22.2	33	13.2
Temperature (°C)	35	35	35	35	35
pH	6.9	6.9	5.9 to 6.2	6.6	6.6
HRT (day)	2.5	1	1.5	1	2.5
Methane production rate (l CH_4/ l .d)	1.14	1.5	0.103	2.04	0.88
Methane Yield (l CH_4/ g VS added)	0.087	0.045	0.062	0.065	0.065
Methane Content (%)	59.6	65.4	48.6	68.9	-
VFA (mg as CH_3COOH/ l)	620	930	1860	630	630

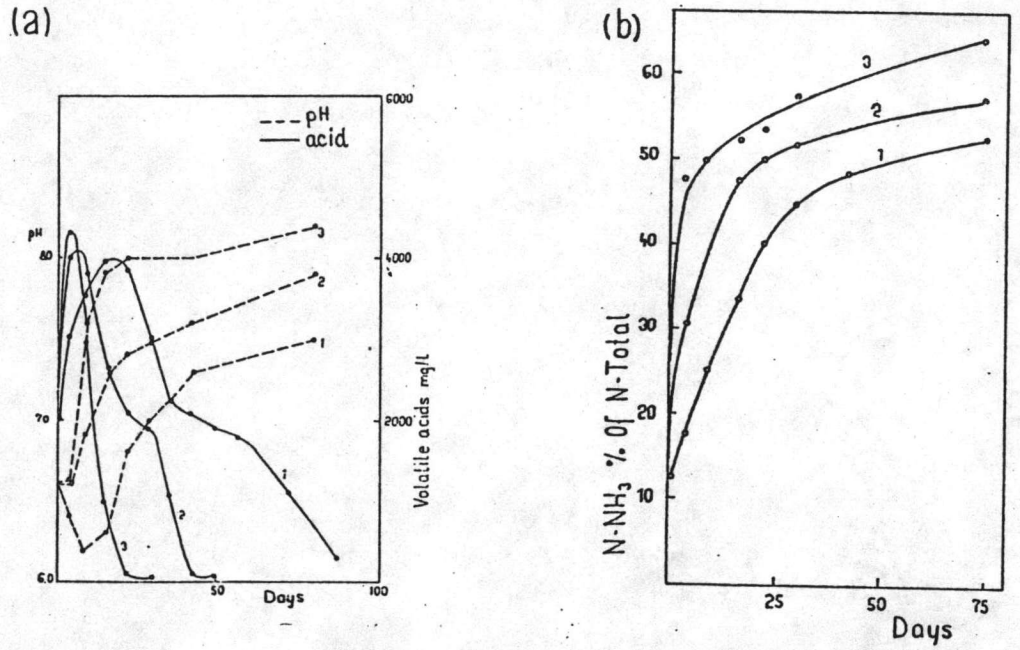
3 เท่า โดยทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเทียบกับระบบบำบัดแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้ถังหมักขนาดความจุ 15 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บ 7.6 วัน พบว่าระบบแบบขั้นตอนเดียวต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนานกว่าที่จะให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซได้ใกล้เคียงกับในระบบแบบสองขั้นตอน และยังพบอีกว่าระบบแบบสองขั้นตอนนี้มีเสถียรภาพดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการแยกออกเป็น 2 ขั้นตอนช่วยลดผลของกรดไขมันโมเลกุลใหญ่ที่มีต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลงได้

Maly และ Fadrus (1971) ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยทำการทดลองแบบกะที่อุณหภูมิ 20 °ซ, 30 °ซ และ

50 °ซ ตัวแปรที่พิจารณาคือ ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซ จากผลการทดลองพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเพิ่มขึ้น (พิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ ในทำนองเดียวกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดอินทรีย์พบว่า มีการเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วจึงลดลง เนื่องจากมีสมดุลระหว่างแบคทีเรียที่ทำหน้าที่สร้างกรดอินทรีย์ และแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการนำกรดชนิดเดียวกันไปใช้ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่แบคทีเรียใช้ในการปรับตัวให้ทำงานสมดุลกันลดลงหรือ bacterial activity เพิ่มขึ้นนั่นเอง (ดังแสดงในรูปที่ 2.16) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อุณหภูมิสูง (50 °ซ) จะมีความเข้มข้นของสารแขวนลอยไนโตรเจน และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูงกว่าด้วย



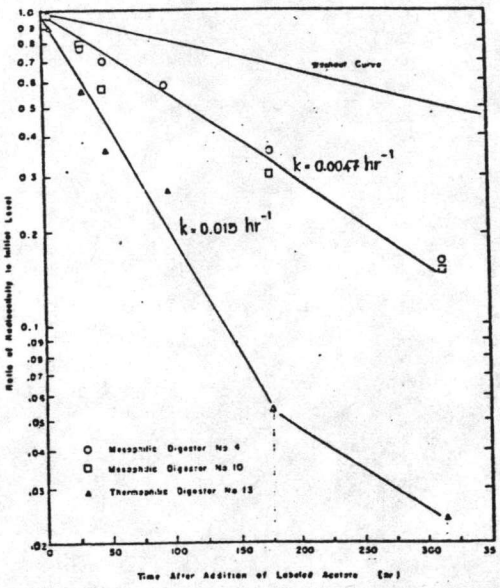
รูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ (a) และ การผลิตก๊าซ (b) ที่อุณหภูมิ 20 °ซ (1), 30 °ซ (2) และ 50 °ซ (3) (Maly and Fadrus, 1971)



รูปที่ 2.16 ปริมาณกรดอินทรีย์กับค่า pH ของระบบ (a) และความเข้มข้นของไนโตรเจน (b) ที่อุณหภูมิ 20 °ซ (1), 30 °ซ (2) และ 50 °ซ (3) (Maly and Fadrus, 1971)

Cooney และ Wise (1975) ทำการศึกษาถึงผลการเปลี่ยนจากน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งสูง (solid waste) ไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (fuel gas; CH_4 + CO_2) ในถังหมักแบบถังกวน ขนาดความจุ 50 ลิตร ที่อุณหภูมิ 65 °ซ (โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิทีละ 3 °ซ ทุก ๆ 3 สัปดาห์) ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน จากผลการทดลองพบว่า อัตราการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่าการทำงานของแบคทีเรียในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงดีขึ้น นั่นหมายถึงอัตราการเติบโตสูงขึ้นนั่นเอง และเป็นที่น่าสนใจว่าระบบยังสามารถทำงานได้ดีแม้จะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในระดับที่สูงกว่า 1,000 มก./ล. ก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายกรดอินทรีย์ (ใช้กรดอะซิติกเป็นหลัก) ไปเป็นก๊าซจะเห็นได้ว่า อัตราการหายไปของกรดอะซิติกเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 โดยมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.015 ชม.$^{-1}$ ที่ 65 °ซ ซึ่งสูงกว่าที่อุณหภูมิ 37 °ซ (k = 0.0047 ชม.$^{-1}$) ถึง 3.2 เท่าทีเดียว รูปที่ 2.17 แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จาก

การทดลองที่อุณหภูมิ 37 °ซ และ 65 °ซ



รูปที่ 2.17 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 37 °ซ และ 65 °ซ (Cooney and Wise, 1975)

Basu และ Leclerc (1975) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่า COD ประมาณ 11,520-17,630 มก./ล. ที่อุณหภูมิปานกลาง (35 °ซ) และอุณหภูมิสูง (55 °ซ) โดยแยกการทดลองออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ การทดลองแบบกะ, แบบระบบดั้งเดิม และแบบระบบประสิทธิภาพสูง ดังนี้

การทดลองแบบกะ จากผลที่ได้พบว่าอัตราการลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 55 °ซ เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 35 °ซ แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลากักเก็บของน้ำกากส่าในถังหมักยังสูงอยู่ (มากกว่า 100 วัน) จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบำบัด

การทดลองระบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 55 °ซ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อย ๆ จาก 1 ไปจนถึง 4 กก./ม.^{3}-วัน พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการผลิตก๊าซลดลงจนถึงอัตราต่ำสุดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4 กก./ม.^{3}-วัน และให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงสุด 92.3 % ที่อัตรา

การป้อนสารอินทรีย์ 1 กก./ม.^{3}-วัน และระยะเวลากักเก็บ 25 วัน เมื่อนำผลการทดลองไปเทียบกับการบำบัดที่อุณหภูมิ 35 °ซ พบว่า ที่อุณหภูมิ 55 °ซ ให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 90.2 %) ที่สภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซขึ้นกับระยะเวลากักเก็บน้ำกากส่าในถังหมัก มากกว่าขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์

การทดลองระบบประสิทธิภาพสูง ใช้ระยะเวลากักเก็บคงที่ที่ 10 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2 ไปจนถึง 3.5 กก./ม^3.-วัน ปริมาณกรดอินทรีย์และค่าสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และสัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ได้ลดลง ส่วนปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ค่อนข้างคงที่ประมาณ 4,500-6,750 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปที่ได้ คือ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซขึ้นกับระยะเวลากักเก็บน้ำเสียมากกว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์

ดังนั้นจากการทดลองนี้ อาจกล่าวได้ว่าระบบบำบัดที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (35 °ซ) เหมาะสำหรับบำบัดน้ำกากส่ามากกว่าระบบบำบัดที่ช่วงอุณหภูมิสูง (55 °ซ) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

Zoetemeyer และคณะ (1982) ได้ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อขั้นตอนการหมักกรด ในช่วงอุณหภูมิ 20-60 °ซ โดยใช้ถังหมักแบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) กับตัวอย่างน้ำที่มีกลูโคสโมโนไฮเดรตเป็นองค์ประกอบอยู่ 1 % จากผลการทดลองพบว่ามีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงาน 2 ช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิปานกลางที่ 36-38 °ซ และช่วงอุณหภูมิสูงที่ 51-53 °ซ ซึ่งเป็นผลให้อัตราเร็วการเจือจาง (dilution rate), อัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ และการกระจายของผลิตภัณฑ์อันได้แก่ แลคเตต, โพรพิโอเนต, บิวทิเรต และเอธานอลแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2.11 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในช่วงอุณหภูมิปานกลาง การกระจายของผลิตภัณฑ์ยังขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์อีกด้วย

เมื่อพิจารณาถึงการทำงานของระบบ พบว่าที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูง ๆ นั้น การทำงานในช่วงอุณหภูมิปานกลางมีเสถียรภาพดีกว่า กล่าวคืออัตราการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปต่ำกว่า และการกระจายของผลิตภัณฑ์คงที่มากกว่า ซึ่งเป็นผลดีทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถปรับตัวได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 2.11 การกระจายของผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการหมักกรดในช่วงอุณหภูมิปานกลางและอุณหภูมิสูง (Zoetemeyer et al., 1982)

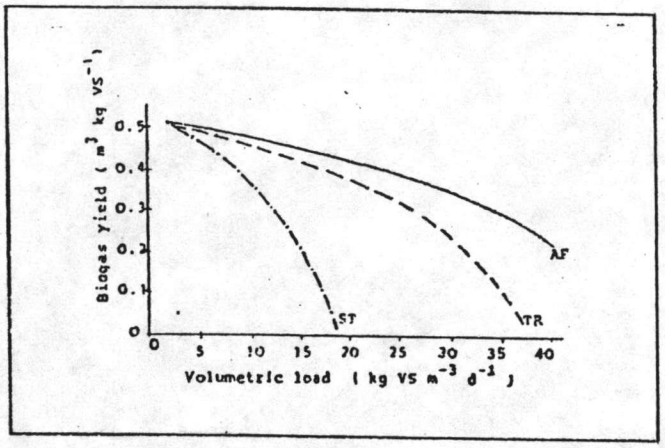
	Mesophilic	Thermophilic
1) Optimum temperature (°C)	36-38	51-53
2) Max. Dilution rate (hr^{-1})	0.51	0.72
3) Optimum sludge loading rate (kg COD/kg dry wt.-day)	77	112
4) Product distribution		
Acetate, Propionate	constant	constant
Butyrate	dominant at all temperature	min. at optimum temperature
Ethanol	important at all temperature	main product
Lactate	significant beyond optimum temperature	significant beyond optimum temperature

Romero, Sales, Cantero และ Galan (1988) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่า 16,000-25,000 มก./ล. (ค่า pH ประมาณ 3.8 และอุณหภูมิประมาณ 90 °ซ) โดยใช้ถังหมักแบบถังกวน ขนาดความจุ 1.8 ลิตร ที่ควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูง (55 $\pm$ 1 °ซ) ซึ่งใช้น้ำกากส่าที่ออกจากระบบในการลดอุณหภูมิของน้ำกากส่าที่ออกจากหอกลั่น

ทดลองที่ระยะเวลากักเก็บต่าง ๆ คือ 20, 12, 10, 8, 7, 6, 5, 4, 3 และ 2 วัน พบว่าที่ระยะเวลากักเก็บ 20 ถึง 3 วันนั้นให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนที่ระยะเวลากักเก็บ 2 วัน พบว่าประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างเห็นได้ชัด สภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้ได้แก่ ที่ระยะเวลากักเก็บ 4 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.25 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 88 % ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ 0.25 ม.^{3} ของมีเทน/กก.ซีโอดีที่ป้อน และสัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้เป็น 61 % เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปเทียบกับระบบเดียวกันที่ควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิปานกลาง พบว่าให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่ระบบที่อุณหภูมิสูงใช้ระยะเวลากักเก็บสั้นกว่า

Braun และ Huss (1982) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการกลั่นแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล, maize และมันฝรั่ง โดยใช้ถังหมัก 3 แบบคือ ถังกวน, ถังหมักแบบท่อไหล (tubular reactor) และถังหมักแบบตัวกลางกรอง จากผลการทดลองพบว่าการทำงานของถังหมักแบบตัวกลางกรองในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกลั่นแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล ดีที่สุดแม้ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงถึง 40 กก.VS/ม.^{3}-วัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ผลการย่อยสลายน้ำเสียจากกลั่นแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล โดยใช้ถังหมักแบบตัวกลางกรองขนาดความจุ 0.5 ม.^{3} ที่อุณหภูมิ 42 °ซ ระยะเวลากักเก็บ 1.2 วัน ปริมาณก๊าซที่ได้สูงสุด 14.2 ม.^{3}/ม.^{3}-วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 38 กก.VS/ม.^{3}-วัน สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซที่ได้ 61 %(v/v) และมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.6-0.8 %(v/v) ส่วนประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงสุดประมาณ 45-50 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2 กก.VS/-ม.^{3}-วัน สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ได้เท่ากับ 75 %(v/v) และมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.25 %(v/v)

Silverio, Anglo, Montero, Pacheo, Alamis และLuis (1986) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่า COD ประมาณ 40,000 จนถึง 80,000 มก./ล.โดยใช้ถังหมักแบบตัวกลางกรอง ขนาดความจุ 5.5 ลิตร ภายในบรรจุเศษอิฐ ทำการควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้คงที่ เพิ่มอัตราการป้อนน้ำกากส่าจาก 0.6 ไปจนถึง 1.5 ลิตร/วัน ระยะเวลา



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบอัตราการรับสารอินทรีย์เมื่อใช้ถังหมักแบบถังกวน, แบบท่อไหล และแบบตัวกลางกรอง (Braun and Huss, 1982)

กักเก็บลดลงจาก 9 วันเป็น 3.6 วันในที่สุด จากผลการทดลองพบว่าถังหมักแบบตัวกลางกรองนี้สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 80 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน โดยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.0 ลิตร/ปริมาตรถังหมัก ที่ระยะเวลากักเก็บ 9 วัน สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้ 70-78 % และให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 50 % เมื่อลดระยะเวลากักเก็บน้ำกากส่าในถังหมักลง พบว่าระบบยังมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 5.5 ไปเป็น 17 ลิตร/ลิตร-วัน แต่อย่างไรก็ตาม การลดระยะเวลากักเก็บลงทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงด้วย สำหรับค่า pH ของระบบคงที่อยู่ในช่วง 6.7-7.0 ซึ่งแสดงถึงระบบมีเสถียรภาพดี เนื่องจากค่าสภาพความเป็นด่างของระบบสูง

Godwin, Wase และ Forster (1982) ทำการทดลองใช้ถังหมักยูเอเอสบี ขนาดความจุ 0.44 ลิตรในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีค่า COD ประมาณ 1,000 มก./ล. และมีปริมาณอะซิเตตสูงกว่า 400 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 35 °ซ โดยมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับ pH ของสิ่งป้อน ทำให้ค่า pH ของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าอยู่ในช่วง 8.0-8.5 และมีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นออกจากถังหมักทันที ซึ่งทำให้ก๊าซที่ได้มีสัดส่วนของมีเทนสูงถึง

99 % ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 70 % ที่ระยะเวลากักเก็บ 9.8 ชม. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.6 กก./ม.^{3}-วัน

Riera และคณะ (1985) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่า COD อยู่ในช่วง 70,000-100,000 มก./ล. โดยใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบีขนาดความจุ 100 ลิตร ที่อุณหภูมิ 40 $\pm$ 2 °ซ ลักษณะการป้อนน้ำกากส่าเป็นแบบต่อเนื่อง ระยะเวลาเก็บข้อมูล 250 วัน จากผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 24 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ของระบบโดยเฉลี่ย 75 % และให้อัตราการผลิตก๊าซ 9 ม.^{3}/ม.^{3}-วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เฉลี่ย 396 $\pm$ 35 ลิตร/กก.ซีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้ 58 $\pm$ 4 % คิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน 316 $\pm$ 30 ลิตร/กก.ซีโอดี ที่ถูกใช้ และยังพบอีกว่า อัตราการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

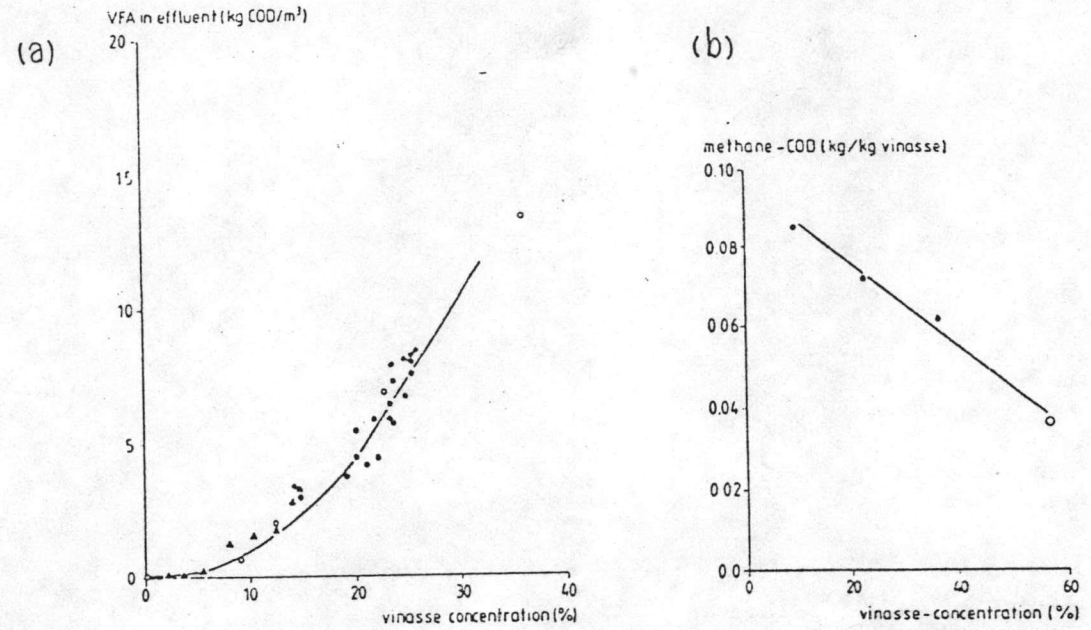
Weigant และ Lettinga (1985) ทำการทดลองใช้ระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันระเหย, กลูโคสหรือซูโครส และยีสต์ โดยใช้ถังหมักยูเอเอสบีขนาดความจุ 5.75 ลิตร ที่ช่วงอุณหภูมิสูง (55 °ซ) ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.12 นอกจากนี้ยังได้ทดลองเลี้ยงตะกอนเม็ดในถังหมักยูเอเอสบีที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ของผสมระหว่างอะซิเตต, โพรพิโอเนต และบิวทิเรต (อัตราส่วน 1:1:1 (w/v)) เป็นสารอาหาร และใช้ตะกอนเม็ดที่อุณหภูมิปานกลางเป็นตะกอนแบคทีเรียตอนเริ่มต้น พบว่าไม่เกิดกระบวนการสร้างตะกอนเม็ด แม้จะสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้ถึง 10 กก./ม.^{3}-วัน ก็ตาม

ตารางที่ 2.12 ตัวแปรต่าง ๆ จากระบบหมักยูเอเอสบีซึ่งใช้ตะกอนแบคทีเรียชนิดอุณหภูมิสูง และสิ่งป้อนที่มีกรดไขมันระเหยเป็นองค์ประกอบหลัก (Weigant and Lettinga, 1985)

Substrate	Acetate and yeast extract	Acids[a] + sucrose	Acids[a] and yeast extract	
Concentration (kg COD/m^3)	1.41	8.02	14.65[d]	kg COD/m^3
VFA (kg COD/m^3)	1.35	6.48	13.32	kg COD/m^3
non-VFA (kg COD/m^3)	0.06	1.54	1.33	kg COD/m^3
Hydraulic retention time (h)	2.1	5.7	3.2	hrs.
Organic loading rate (kg COD/m^3 day)	16.0	35	104	kg COD/m^3.d
Treatment efficiency[b] (%)	98.9	84.5	77.6	%
Duration[c] (days)	31	105	182	days

[a] The acids were acetate, propionate, and butyrate in a 1:1:1 (w/v) ratio.
[b] This is L effluent VFA COD/L influent COD) × 100%.
[c] With duration the period of continuous feeding with the substrate mentioned is meant, not the period of maintenance of the process parameters given.
[d] These parameters were measured in a 0.70-L UASB reactor.

Wiegant, Claassen และ Lettinga (1985) ทำการทดลองบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่า COD ประมาณ 16,660-29,750 มก./ล. โดยใช้ถังหมักยูเอเอสบี ขนาดความจุ 5.5 ลิตร ที่ช่วงอุณหภูมิสูง (55 °ซ) ใช้เม็ดตะกอนแบคทีเรียซึ่งเพาะเลี้ยงในช่วงอุณหภูมิสูงเป็นตะกอนเริ่มต้นในระบบ ทำการป้อนน้ำกากส่าเข้าถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่าระบบต้องใช้เวลาในการปรับตัวยาวนานถึงประมาณ 4 เดือน ซึ่งหลังจากระยะเวลาปรับตัวนี้ ระบบสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 98.3 กก./ม.^{3}-วัน (ที่ระยะเวลากักเก็บ 2.5 ชม. และให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทน 26 ม.^{3}/ม^3.-วัน) ระบบจึงเสียสมดุล นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ และอัตราการผลิตก๊าซมีเทน ไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ แต่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำกากส่าที่ใช้ (ดังแสดงในรูป 2.19) สำหรับการเปลี่ยนแปลงของเม็ดตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำกากส่าสูงๆ ขนาดของตะกอนเม็ดจะลดลง (ขนาดเล็กกว่า 0.5 มม.) และมีการ wash out ออกไปบางส่วน ทำให้ปริมาตรของเบดเหลือน้อยกว่า 50 % ของปริมาตรถังหมัก อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนนี้ ไม่พบว่ามีผลต่อการทำงานของระบบ



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำกากส่ากับความเข้มข้นของกรดไขมันระเหย (a) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทน (b) ที่ได้จากผลการทดลอง (Weigant et al., 1985)

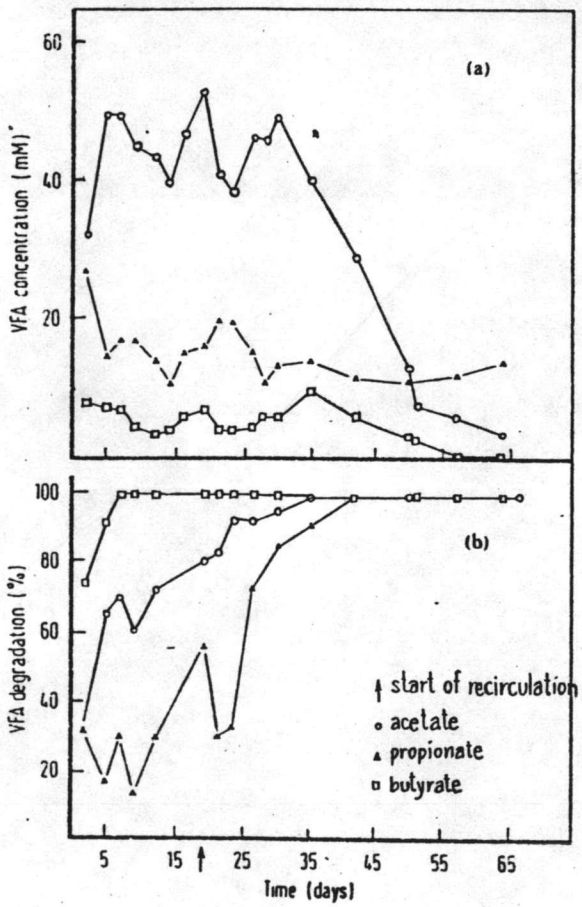
Wiegant และ Man (1986) ทำการศึกษาถึงกระบวนการเกิดตะกอนเม็ดในถังหมักยูเอเอสบีที่อุณหภูมิสูง (55 °ซ) โดยใช้สิ่งป้อนที่มีอะซิเตตและส่วนผสมระหว่างอะซิเตตและบิวทิเรตเป็นองค์ประกอบ แบคทีเรียที่สำคัญในตะกอนเม็ดคือ *Methanothrix soehngenii* และ *Methanosarcina* ซึ่งการเลือกชนิดของแบคทีเรียทั้งสองขึ้นกับการควบคุมความเข้มข้นของอะซิเตตในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบให้มีค่าต่ำกว่า 200 และ 700 มก./ล. สำหรับ *Methanothrix* และ *Methanosarcina* ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 162 กก.มีเทน-ซีโอดี/ม.^{3}-วัน หรือ 2.53 โมลของมีเทน/ลิตร-วัน ที่ระยะเวลากักเก็บ 21 นาที และตะกอนเม็ดที่ได้ประกอบด้วย *Methanothrix* เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าชนิดของตะกอนแบคทีเรีย (seed material) และการเติมวัสดุเฉื่อยจะมีผลต่อความเร็วในการเกิดตะกอนเม็ดและช่วงเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ

Souza, Fuzaro และPolegata (1992) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำกากส่าที่เจือจางให้มีค่า COD ประมาณ 31,500 มก./ล. โดยใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบีขนาดความจุ 75 ม.^{3} ที่อุณหภูมิ 55-57 °ซ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 280 วัน และมีการนำน้ำกากส่าที่ออกจากระบบกลับมารีไซเคิลเพื่อลดอุณหภูมิของน้ำกากส่าที่ออกจากหอกลั่น หลังจากเริ่มต้นระบบได้ 140 วัน (ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 15 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน) พบว่าปริมาณตะกอนลดลงเหลือต่ำสุด ปริมาณกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นและค่า pH ลดลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซลดลง จึงต้องลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลงเพื่อเริ่มต้นเดินระบบใหม่ ซึ่งหลังจากนั้นพบว่าสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 30 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน และประสิทธิภาพในการลดปริมาณซัลเฟตสูงถึง 98 % เสถียรภาพของระบบดีมาก แม้จะมีปริมาณกรดอินทรีย์ค่อนข้างสูงก็ตาม (ปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำที่ออกจากระบบประมาณ 1,600 มก./ล.)

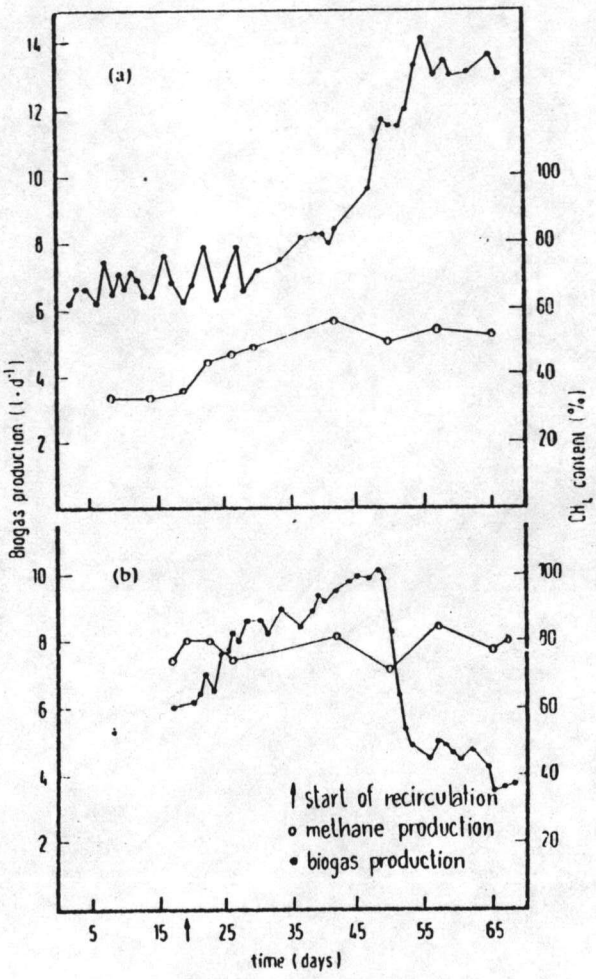
อะเคื้อ บุญญสิริ (2536) ทำการทดลองบำบัดน้ำกากส่าที่มีค่า COD ประมาณ 110,000 มก./ล. โดยใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบี ขนาดความจุ 34.7 ลิตร ที่อุณหภูมิ 55 °ซ ทำการควบคุมระบบโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงสุด 10.1 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน ที่ระยะเวลากักเก็บ 11 วัน ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ 0.612 ม.^{3}/ม.^{3}-วัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 44 % และให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน 0.137 ม.^{3}/กก.ซีโอดี ที่ถูกกำจัด สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนคือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 7.1 กก.ซีโอดี/ม.^{3}-วัน ระยะเวลากักเก็บน้ำกากส่าในถังหมัก 11 วัน ให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 22.1 ลิตร/วัน คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน 0.204 ม.^{3}/กก.ซีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 0.090 ม.^{3}/กก.ซีโอดี ที่ป้อนเข้าระบบ

Gijzen และคณะ (1988) ศึกษาถึงการใช้ถังหมักยูเอเอสบีเป็นถังหมักมีเทนในระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน สำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ที่อุณหภูมิ 39 °ซ ระยะเวลากักเก็บในถังหมักมีเทน 20 วัน และมีการนำน้ำเสียที่ออกจากถังหมักมีเทนกลับเข้าสู่ถังหมักกรดอย่างต่อเนื่อง ค่า pH ในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนอยู่ในช่วง 6.1-6.6 และ

7.4-7.8 ตามลำดับ พบว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 11.9-25.8 กรัม VS/ลิตร-วัน นั้น อัตราการป้อนสารอินทรีย์ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาการหมักในถังหมักกรด ส่วนในถังหมักมีเทนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุด ประสิทธิภาพในการนำกรดอินทรีย์ไปใช้ลดลงจาก 93-97 % เป็น 53 % ทำให้มีกรดอินทรีย์สะสมสูงขึ้น องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักกรดและถังหมักมีเทนมีมีเทนเป็นองค์ประกอบ 35-40 % และ 78-90 % ตามลำดับ ส่วนปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการนำน้ำเสียที่ออกจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิลเข้าสู่ถังหมักกรดทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์จากถังหมักกรดลดลง pH เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซที่ได้จากถังหมักกรดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21) แสดงว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนบางส่วนที่ติดมากับน้ำเสียที่รีไซเคิลสามารถเติบโตได้ในสภาวะของถังหมักกรด



รูปที่ 2.20 ผลของการนำน้ำเสียจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิลต่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ใน (a) ถังหมักกรด และประสิทธิภาพในการใช้กรดอินทรีย์ใน (b) ถังหมักมีเทน (Gijzen et al., 1988)



รูปที่ 2.21 ผลของการนำน้ำเสียจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ได้จาก (a) ถังหมักกรด และ (b) ถังหมักมีเทน (Gijzen et al., 1988)

ตารางที่ 2.13 การประยุกต์ใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่าง ๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ (Lettinga et al., 1980)

Origin	Waste solution: COD total (mg/liter)	Waste solution: COD dissolved[b] (%)	Waste solution: VFA (mg/liter)	Maximum COD load applied: space load ($kg \cdot m^{-3}$/day)	Maximum COD load applied: sludge load (kg/kg VSS/day)	Maximum COD load applied: HRT (hr)	COD reduction (%)	Sludge yield factor (kg/kg COD)	Temp. (°C)	UASB reactor: volume (liter)	UASB reactor: height (cm)
Sugar-beet sap, unsoured	5000–6000	95	nil	4–5 (diss.)	0.5–0.8	48–24	95	0.15	30	61	105
Sugar-beet sap, soured (closed circuit)[c]	6000–9500	80–60	4000–5000	8–10 (diss.) 10–14 (total)	0.7–1.1	12–24	84–95 (diss.) 65–75 (tot.)	0.09–0.07 (diss.) >0.1 (tot)	30	18 30	70 100
Sugar-beet sap, soured (two-stage)	6000–9000	95	5400–8000	8–9 (2nd stage)	0.8–1.0 (2nd stage)	24	90–97	0.04–0.03	30	18	70
Bean blanching	5200	90	500–1500	8–10	0.6–0.8	13–15	90–95	–	30	2.7	30
Sauerkraut	10000–20000	97	400–1500	8–9	0.8–1.2	>24	88–93	0.05–0.07	30	2.7	30
Dairy (skimmed milk)	1500	>75	nil	7–8	0.4–0.6	5	90	<0.18[d]	30	18	70

[a] Values mentioned for the COD load concern the maximum values that could be applied in the specific experiment.

[b] COD remaining after filtration over a filter SS 520 b.

[c] Experiments conducted in a closed simulated wastewater circuit; a known amount of sugar-beet sap solution is supplied continuously in the circuit water.

[d] Higher values are obtained in case of substrate precipitation (i.e., at a pH fall or in case of overloading).

ตารางที่ 2.14 การประยุกต์ใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่าง ๆ ในระดับขยายขนาด (Lettinga et al., 1980)

Code Origin	COD (mg/liter)	COD/BOD	$\frac{COD_{VFA}}{COD_{tot}}$	pH	Total-N	Total-P
Sugar-beet wastes (6 m^3 pilot plant)						
(a) Campaign waste[a]	1000–4500	1.6–2.1	0.5–0.8	6.5–7.5	25–100	3–30
(b) Stored campaign waste	1000–3000	1.6–2.1	0.5–0.8	6.5–7.5	40	3
(c) Liquid sugar waste[b]	6000–18000	1.6	0.2	3.8–4.3	30–80	1–3
Sugar-beet waste (200 m^3 full-scale plant)						
Campaign[a]	1000–5500	1.6–2.1	0.5–0.85	6.5	30–110	5–20
Potato-processing waste (6 m^3 pilot plant)						
Campaign[c]	2000–5000	1.6	0.08–0.3	4.5	50–100	5–10

[a] Campaign waste contained varying amounts of suspended matter, viz. generally in the range 0.2–1.5 g/liter, but occasionally—due to the presence of clay—reaching values of 1.5–3 g/liter with peak values up to 30 g/liter!

[b] Diluted with tap water to 2000–6000 mg COD/liter and supplied with varying amounts of soda or bicarbonate before introducing it in the reactor.

[c] Supplied with 15–25 mequiv/liter of either bicarbonate (period 0–361) or lime (period 361–438) before it is introduced in the reactor.

ตารางที่ 2.15 ประสิทธิภาพในการใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอนสำหรับบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ (Sumaeth, 1988)

Type of waste	COD mg/l	Loading kg COD/m^3.d	HRT (day) First stage	HRT (day) Second stage	HRT (day) Total	Gas Yield m^3 /kg COD fed	COD Removal %	BOD Removal %	System
Flex retting waste	7,000	10			0.71	0.42	87	93	UASB COD loading 350 kg / d
Molasses Alcohol waste	34,100	13.6	0.58	1.92	2.5	0.31	81	-	UASB 30 m^3 for acid tank 100 m^3 for methane tank
Molasses Alcohol waste	26,500	8	0.77	2.56	3.33	0.31	72	-	UASB 30 m^3 for acid tank 100 m^3 for methane tank
Yeast Alcohol waste		30	-	-	1-1.5 h	0.0138	-	-	Anaerobic Fluid bed 380 m^3
		30	-	-	1.5-2 h	0.0143	-		125 m^3
Sugar cane Distillery waste	100,000	15	1	6.67	7.67	0.25	70	90	UASB acid tank 450 m^3 methane tank 3,000 m^3
Piggery waste			2	12	14		-	-	Anaerobic Contact

ตารางที่ 2.16 ประสิทธิภาพในการใช้ถังหมักแบบยูเอเอสบีสำหรับบำบัดน้ำเสีย ในระบบแบบสองขั้นตอน (Sumaeth, 1988)

Type of waste	Feed COD mg/l	Loading kg COD/m^3.d	HRT (day) First stage	HRT (day) Second stage	HRT (day) Total	Gas Yield m^3/kg COD fed	COD Removal %	BOD Removal %	System
Enzyme and alcohol waste	10,000	4.1	-	-	2.42	0.41	79	88	UASB
Beet sugar waste	6,000	10.8	-	-	0.55	0.66	90	93	UASB
Yeast and alcohol waste	32,000	11.6	-	-	2.75	0.73	72	88	UASB
Molasses alcohol waste	35,000	12	1	1.8	2.8	0.33	77	-	UASB