

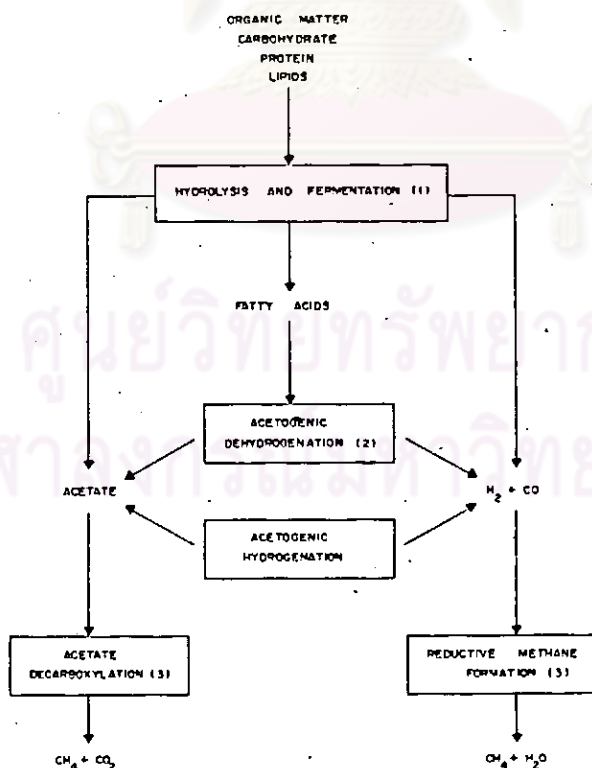


ทฤษฎี และแนวความคิด

2.1 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

เนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จะต้องอาศัยแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic bacteria) ทำงาน ดังนั้นสิ่งจำเป็นจะต้องมีความเข้าใจการทำงานของแบคทีเรียจำพวกนี้ โดยสังเขป

จากการศึกษาทางด้านจุลชีววิทยา และเคมีของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานของกระบวนการได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ขบวนการสร้างกรด (acid formation) และขบวนการสร้างมีเทน (methane formation) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



- (1) FERMENTATIVE BACTERIA
- (2) THE OBLIGATE H₂ - PRODUCING, ACETOGENIC BACTERIA
- (3) THE METHANOGENIC BACTERIA

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (3)

2.1.1 ขบวนการไฮโดรไลซิส

สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (complex organic compound) ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกทำให้เป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก สามารถละลายน้ำ เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล กรดไขมัน โดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ออกมาสู่ภายนอก (external enzymes) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีการกำจัดซัลไฟด์

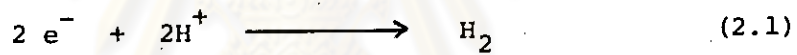
2.1.2 ขบวนการสร้างกรด

สารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย ที่ถูกสร้างขึ้นในขั้นตอนแรกจะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานของแบคทีเรียพวก facultative และ obligate anaerobic โดยขบวนการการหมัก (fermentation) ผลปฏิกิริยาของขบวนการการหมัก มีทั้งพวกที่อยู่ในรูปออกซิไดส์และรีดิวซ์ พวกที่อยู่ในรูปออกซิไดส์ ส่วนใหญ่จะเป็นกรดโวลาทิล (volatile acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (propionic acid) กรดบิวไทริก (butyric acid) กรดแวลเลริก (valeric acid) และกรดคาโปรอิก (caproic acid) แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขบวนการนี้เรียกว่า แบคทีเรียสร้างกรด (acid formers) หรือ non-methanogenic bacteria ตารางที่ 2.1 แสดง non-methanogenic bacteria ที่พบในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ส่วนผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ มีอยู่หลายอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียที่สร้างกรดบางชนิดสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดไฮโดรเจนโมเลกุลขึ้นมา แต่ผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ตัวอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว เป็นต้น ไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นเล็กน้อย ถ้าหากไม่มีการสร้างไฮโดรเจนโมเลกุลขึ้นมา แบคทีเรียที่สร้างกรดเหล่านี้จะใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ตัวอื่น ๆ เช่น เมทานอล (methanol) อีธานอล (ethanol) โพรพานอล (propanol) บิวทานอล (butanol) หรือกรดแลคติก (lactic acid) เป็นต้น นอกจากนี้แบคทีเรียบางชนิดยังสามารถสร้างกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนโมเลกุล ได้จากกรดโวลาทิลที่มีขนาดใหญ่กว่ากรดอะซิติก หรือผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ตัวอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาตอนแรก ๆ

ตารางที่ 2.1 ชนิดของ non - methanogenic bacteria ที่พบในกากหมักมูลสุกร (4)

Genus	Bacterial species	Reference
Aerobacter	A. aerogenes	TOERIEN(1967a)
Aeromonas	Aeromonas sp.	KOTZE et al.(1968)
Alcaligenes	A. bookerii	TOERIEN(1967b)
	A. faecalis	McCARTY et al.(1962), TOERIEN(1967b)
	A. viscolactis	McCARTY et al.(1962)
	Alcaligenes sp.	KORZE et al.(1968)
Bacillus	B. cereus	HATTINGH et al.(1967), TOERIEN(1967a,b)
	B. cereus var mycoides	HATTINGH et al.(1967), TOERIEN(1967a,b)
	B. circulans	TOERIEN(1967a,b)
	B. endorhythmos	BUCK et al.(1954)
	B. firmus	TOERIEN(1967b)
	B. knefelkampii	COOKSON and BURBANK(1965), BURBANK et al.(1966)
	B. megaterium	HATTINGH et al.(1967), TOERIEN(1967a,b)
	B. pantothenicus	HATTINGH et al.(1967)
	B. pumilus	HATTINGH et al.(1967), TOERIEN(1967b)
	B. sphaericus	TOERIEN(1967b)
	B. subtilis	TOERIEN(1967a)
	Bacillus sp.	TOERIEN(1967a)
Bacteroides	Bacteroides sp.	POST et al.(1967)
Clostridium	C. aminovalericum	HARDMAN and ATADTMAN(1960)
	C. carmofoetidum	COOKSON and BURBANK(1965), BURBANK et al.(1966)
Escherichia	E. coli	McCARTY et al.(1962), COOKSON and BURBANK(1965)
		BURBANK et al.(1966), TOERIEN(1967b)
	E. intermedia	TOERIEN(1967a)
	Escherichia sp.	KOTZE et al.(1968)
Klebsiella	Klebsiella sp.	BURBANK et al.(1966)
Leptospira	L. bitlexa	TOERIEN(1967b)
	Leptospira sp.	MAKI(1954)
Micrococcus	M. candidus	TOERIEN(1967a,b)
	M. luteus	TOERIEN(1967b)
	M. varians	McCARTY et al.(1962), TOERIEN(1967a,b)
	M. ureae	TOERIEN(1967a,b)
	Micrococcus sp.	KOTZE et al.(1968)
Neisseria	N. catarrhalls	McCARTY et al.(1962)
Paracolonbacillum	P. intermedium	TOERIEN(1967b)
	P. coliforme	TOERIEN(1967b)
Proteus	P. vulgaris	TOERIEN(1967b)
Pseudomonas	P. aeruginosa	TOERIEN(1967a)
	P. ambigua	TOERIEN(1967a)
	P. denitrificans	BURBANK et al.(1966)
	P. oleovorans	TOERIEN(1967a)
	P. perolens	TOERIEN(1967b)
	P. pseudomallei	TOERIEN(1967a)
	P. reptilivora	McCARTY et al.(1962), TOERIEN(1967b)
	P. riboflavina	TOERIEN(1967b)
	Pseudomonas spp.	BURBANK et al.(1966), HATTING et al.(1967)
		KOTZE et al.(1968) TOERIEN(1967a,b)
Rhodopseudomonas	R. pulvisiris	TOERIEN(1967b)
Sarcina	S. cooksonii	COOKSON and BURBANK(1965), BURBANK et al.(1966)
	S. lutea	McCARTY et al.(1962)
Serratia	S. indlcans	BURBANK et al.(1966)
Streptococcus	S. diploidus	BUCK et al.(1953)
Streptomyces	S. bikiniensis	TOERIEN(1967b)

เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนสามารถสร้างกรดได้ แต่แบคทีเรียที่สร้างกรดไม่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้ ทำให้ยากที่จะแยกแบคทีเรียทั้งสองชนิดนี้ได้ ดังนั้นเราจึงจัดให้แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่สร้างกรด และอาจเรียกแบคทีเรียทั้งสองชนิดนี้อาจเรียกรวมกันได้ว่าเป็น non-methanogenic bacteria ซึ่งผลปฏิกิริยาสุดท้ายจากเมตาบอลิซึม (metabolism) ของแบคทีเรียเหล่านี้ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และกรดฟอรั่มิก ถ้าไม่มีการสร้างไฮโดรเจนเกิดขึ้น น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนนี้ยังคงมีสารอาหาร (substrate) เหลืออยู่เกือบเท่าเดิม เหตุที่สารอาหารถูกกำจัดออกไปเป็นส่วนน้อยมาก เพราะว่ามีอิเล็กตรอนที่อยู่ในสารอาหารจะถูกส่งต่อไปยังสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย และเกิดจากการสูญเสียประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ (microbial inefficiency) ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปของสารอินทรีย์เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการสร้างไฮโดรเจน อิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านไปให้กับไฮโดรเจนไอออน ทำให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนหนี้ออกจากระบบ ดังสมการที่ 2.1



ดังนั้นการสร้างไฮโดรเจนจึงเป็นการลดจำนวนอิเล็กตรอนของสารอาหาร ทำให้ลดปริมาณสารอาหารลงนั่นเอง

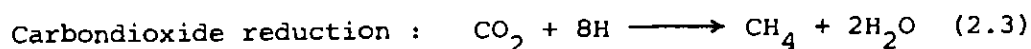
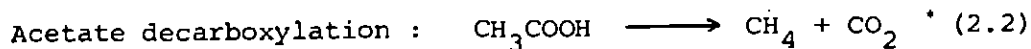
2.1.3 ขบวนการสร้างมีเทน

กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในขั้นที่สอง จะเป็นสารอาหารของกลุ่มแบคทีเรียที่ต้องอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ (obligate anaerobic bacteria) มีชื่อเรียกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน (methane formers bacteria) หรือ methanogenic bacteria จากการศึกษาค้นคว้าของ Wolfe (5) พบว่ามีเทนแบคทีเรียที่เป็นเชื้อบริสุทธิ์ (pure culture) มีอยู่เพียง 8 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ต่อมา Zeikus (6) ได้ค้นพบมีเทนแบคทีเรียที่เป็นเชื้อบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นอีกตัวหนึ่ง มีชื่อเรียกว่า *Methanobacterium thermoautophicum* ซึ่งใช้ H_2 เป็นสารอาหารมีเทนแบคทีเรียดังกล่าวจะทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์ ให้เป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองของ Stadtman และ Barker (7) Pine และ Barker (8) พบว่าการเกิดก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้จากการดีคาร์บอกซิเลชันของกรดอะซิติก (acetate decarboxylation) และ

ตารางที่ 2.2 ชนิดของ methanogenic bacteria ที่เป็นเอ็อนทรีย์ (5)

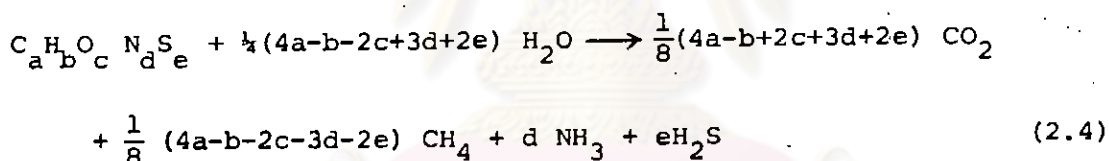
ORGANISM	SOURCE	MORPHOLOGY	GRAM REACTION	SUBSTRATES	NUTRITIONAL REQUIREMENT		
					NITROGEN	VITAMINS:	OTHER
Methanobacterium ruminantium	Rumen	Coccus to rod in chain	+	H ₂ + CO ₂ formate	NH ₃	Growth factor from rumen fluid	Acetate, 2 Methylbutyrate
	Sludge	As above	+	H ₂ + CO ₂ formate.	NH ₃	Above growth factor not required B. Vitamin stimulatory	Acetate
Methanobacterium strain M.O.H.	Methanobacillus Omelianski	Irregularly curved rod	Variable	H ₂ + CO ₂ (formate not used)	NH ₃	B. Vitamins stimulatory	Acetate Stimulatory
Methanobacterium Formicicum	Mud , sludge	Irregularly curved rod	Variable	H ₂ + CO ₂ formate	NH ₃	(?)	(?)
Methanobacterium mobilis	Rumen	Short rod motile	-	H ₂ + CO ₂ formate	NH ₃	Growth factor from rumen fluid	(?)
Methanobacterium barkeri	Mud , sludge	Sarcina	+	H ₂ + CO ₂ Methanol , acetate	NH ₃	None	None
Methanococcus vannielii	Mud	Motile coccus	(?)	H ₂ + CO ₂ formate	NH ₃	None	None
Methanospirillum sp.	Sludge	Spirillum	+	H ₂ + CO ₂ Formate	-	-	-
Methanococcus sp.	Sludge	Coccus	+	H ₂ + CO ₂ formate	-	-	-

การรีดักชันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide reduction) ดังแสดงในสมการ
ที่ 2.2 และ 2.3

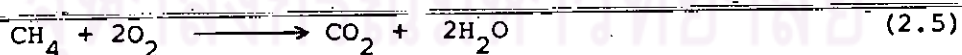


Mc Carty (9) และ Jeris (10) พบว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 72 ได้มาจากการลดอะซีติก และอีกร้อยละ 28 ได้มาจากการลดไพรโอโอมิดและกรดโวลลาไทลอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

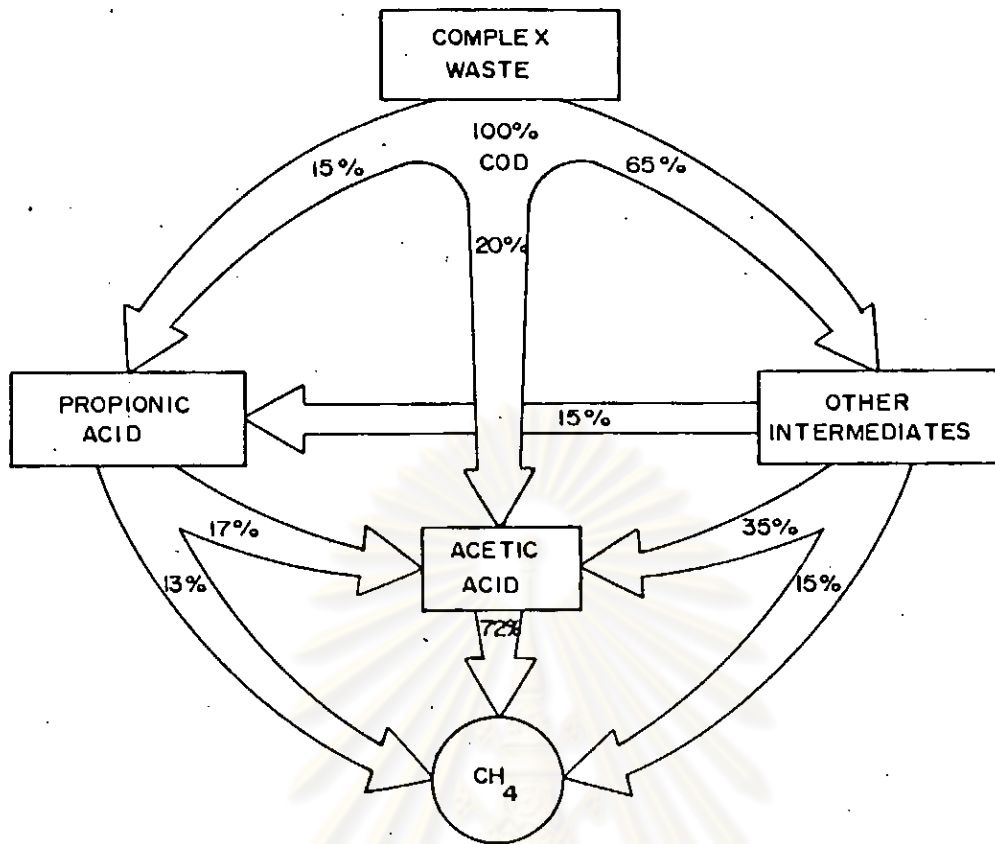
เนื่องจากก๊าซมีเทนเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ มีความซับซ้อนยากแก่การเข้าใจ ดังนั้นจากการศึกษาของ A.M. Buswell และผู้ร่วมงาน (11, 12, 13) ทำให้สามารถเขียนสมการทั่ว ๆ ไป ที่ง่ายต่อการเข้าใจถึงสัมมูลย์ของมวลระหว่างสารอาหาร ที่ถูกย่อยสลาย และก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



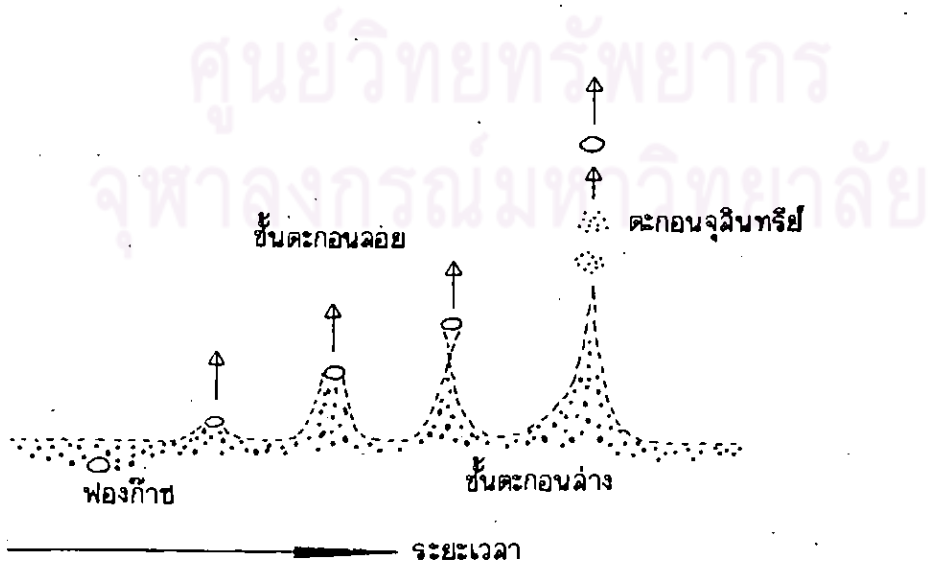
Mc Carty (14) พบว่า ขณะที่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศทำงานอยู่ พลังงานทั้งหมดของสารอาหารจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทน และของเหลวซึ่งก๊าซมีเทนจำนวน 1 โมล จะต้องการออกซิเจนจำนวน 2 โมล เพื่อใช้ในการออกซิไดซ์ให้ได้ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.5



จากสมการที่ 2.5 จะได้ว่า 1 กรัมของซีโอดี ที่ถูกกำจัดไปจะผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.351 ลิตร ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้อากาศโดยแสดงด้วยค่า ซีโอดี (9)



รูปที่ 2.3 แสดงการลดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์โดยก๊าซที่เกิดในชั้นตะกอนล่าง

2.2 พลังงานจากก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (methane) ร้อยละ 60 ถึง 70 ก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์ (carbondioxide) ร้อยละ 30 ถึง 40 นอกจากนี้ยังมีก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulphide) ก๊าซแอมโมเนีย (ammونيا) และความชื้น (moisture) ปนอยู่เล็กน้อย (15) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอาหารแต่ละชนิด เนื่องจากก๊าซมีเทนมีอยู่ในก๊าซชีวภาพเป็นปริมาณมาก ดังนั้นจึงควรทราบคุณสมบัติของก๊าซมีเทน ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของก๊าซมีเทน (16,17)

พลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง เช่นใช้ในการปรุงอาหาร ให้แสงสว่าง ให้ความร้อน และใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เป็นต้น ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ต้องการใช้สำหรับจุดประสงค์ต่าง ๆ (18)

Hawkes (19) กล่าวว่าพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปจะมีค่าของความร้อน (caloric values) ประมาณ 4,800 - 6,200 กิโลแคลอรีต่อ ลบ.เมตร หรือก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. จะให้ความร้อนเทียบเท่ากับน้ำมันเบนซิน 0.625 ลิตร หรือถ่าน 1.46 กิโลกรัม ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าของความร้อนของก๊าซชีวภาพกับก๊าซเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ (20)

2.3 กระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ใรรอากาศแบบไหลขึ้น

2.3.1 แนวความคิดของกระบวนการ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ผ่านมา ประสบปัญหาบางประการในการออกแบบและควบคุมการทำงานได้แก่ การแยกตะกอนจุลินทรีย์ (biomass) ไม่ให้หลุดออกไปกับน้ำออก (effluent) ระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบ (hydraulic retention time) นานกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน และเสถียรภาพในการทำงานของระบบต่ำ เป็นต้น

จากปัญหาที่กล่าวมาแล้ว Stander (2) ซึ่งเป็นผู้ค้นพบความสำคัญของการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้ผิอยู่ในถังหมักเป็นจำนวนมาก ๆ โดยทำถังตกตะกอนติดตั้งอยู่ที่ส่วนบนของถังหมักเพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ ออกจากน้ำออกมาเก็บไว้ในถังหมักอีก การทำเช่นนี้สามารถที่จะลดระยะเวลา

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของก๊าซมีเทน (16,17)

Chemical formula:	CH ₄
Molecular weight:	16.042
Boiling point at 14.696 psia(760 mm)	-258.68°F (-161.49°C)
Freezing point at 14.696 psia(760 mm)	-296.46°F (-182.48°C)
Critical pressure:	673.1 psia (47.363 kg/cm ²)
Critical temperature:	-116.5°F (-82.5°C)
Specific gravity:	
Liquid (at -263.2°F {-164°C})	0.415
Gas (at 77°F {25°C} and 14.696 psia {760 mm})	0.000658
Specific volume at 60°F (15.5°C) & 14.696 psia (760 mm):	23.61 ft ³ /lb (1.471/gm)
Calorific value 60°F (15.5°C) & 14.696 psia (760 mm):	1,012 Btu/ft ³ (38,130.71 KJ/m ³)
Air required for combustion ft ³ /ft ³	9.53
Flammability limits:.	5 to 15 percent by volume
Octane rating:	130
Ignition temperature:	1,202°F (650°C)
Combustion equation:	CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O
O ₂ /CH ₄ for complete combustion:	3.98 by weight
O ₂ /CH ₄ for complete combustion:	2.0 by volume
CO ₂ /CH ₄ from complete combustion:	2.74 by weight
CO ₂ /CH ₄ from complete combustion:	1.00 by volume

ตารางที่ 2.4 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ต้องการใช้สำหรับจุดประสงค์ต่าง ๆ (18)

Use	Specification	Quantity of Gas Required	
		ft ³ /hr	m ³ /hr
Cooking	2" burner	11.5	0.33
	4" burner	16.5	0.47
	6" burner	22.5	0.64
	2"-4" burner	8 - 16	0.23 - 0.45
	per person/day	12 - 15	0.34 - 0.42
Gas lighting	per person/day	12	0.34
	per lamp of 100 candle power	4.5	0.13
	per mantle	2.5	0.07
	per mantle	2.5 - 3.0	0.07 - 0.08
	2 mantle lamp	5	0.14
Gasoline or diesel engine (a)	3 mantle lamp	6	0.17
	converted to biogas, per hp	16 - 18	0.45 - 0.51
	Refrigerator	per ft ³ capacity	1
Incubator	per ft ³ capacity	1.2	0.034
	per ft ³ capacity	0.45 - 0.6	0.013-0.017
Gasoline	per ft ³ capacity	0.5 - 0.7	0.014-0.020
	1 litre	47 - 66(b)	1.33- 1.87(b)
Diesel fuel	1 litre	53 - 73(b)	1.50-2.07
	Boiling water	1 litre	3.9(c)

(a) Based on 25 per cent efficiency.

(b) Absolute volume of biogas needed to provide energy equivalent of 1 liter of fuel.

(c) Absolute volume of biogas needed to boil off 1 litre of water.



ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบค่าของความร้อนของก๊าซชีวภาพกับก๊าซเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ (20)

Gas	Calorific Values		
	BTU/ft ³	J/cm ³	k cal/m ³
Coal gas	450 - 500	16.7 - 18.5	4,000 - 4,400
Biogas	540 - 700	20.0 - 26.0	4,800 - 6,200
Methane	896 - 1,069	33.2 - 39.6	7,900 - 9,500
Natural gas	1,050 - 2,200	38.9 - 81.4	9,300 - 19,450
Propane	2,200 - 2,600	81.4 - 96.2	19,450 - 22,980
Butane	2,900 - 3,400	107.3 - 125.8	25,630 - 30,000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

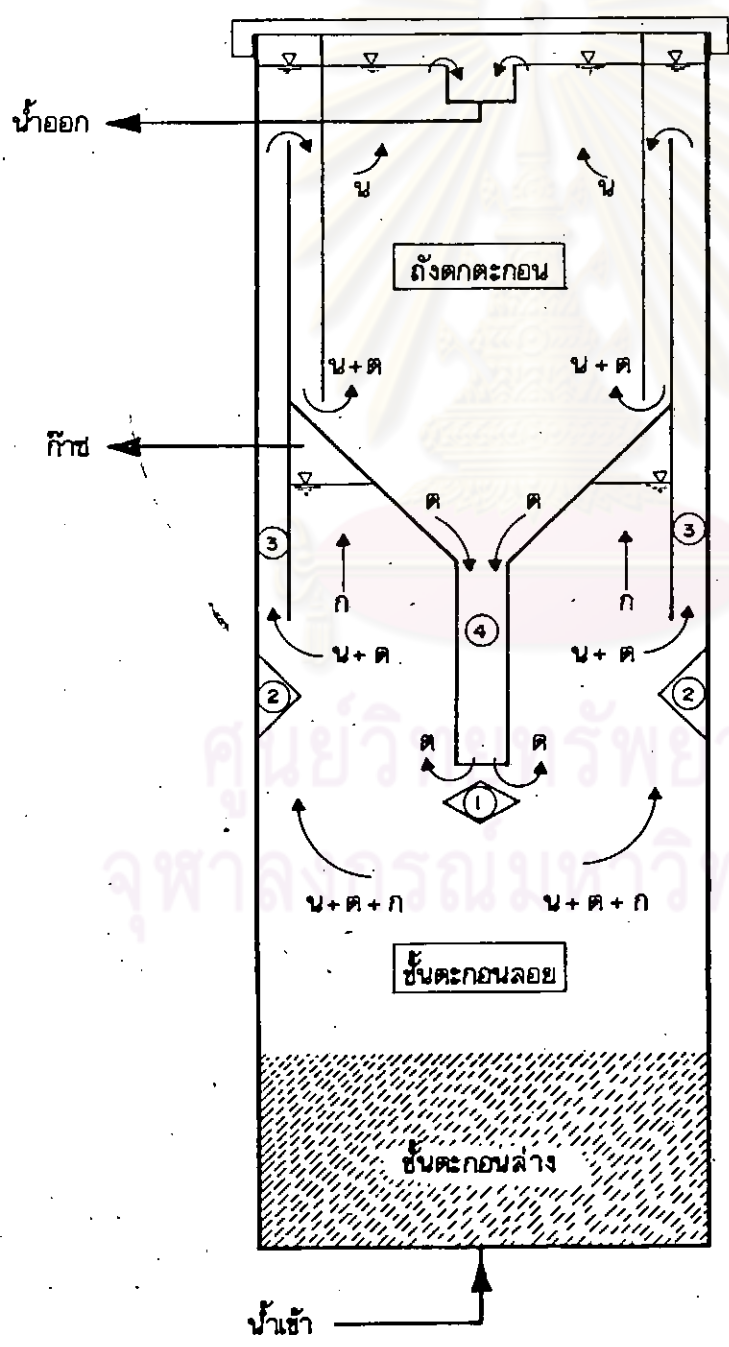
ในการบำบัดน้ำเสียให้ล้นลง และยังสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบได้มากขึ้นด้วย Lettinga และผู้ร่วมงาน (21) ได้พัฒนาแนวความคิดของ Stander โดยเปลี่ยนแปลงวิธีการแยกก๊าซ และการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำออก จึงได้เรียกชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการขึ้นตะกอน จุลินทรีย์ ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Process)

2.3.2 ลักษณะและการทำงานของกระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น

กระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศด้วยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ ลักษณะทั่วไปของถังปฏิกริยาเป็นถังปิดรูปทรงกระบอกหรือถังปิดรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นถังหมักอยู่ส่วนล่างของถังปฏิกริยา ส่วนที่สองเป็นถังตกตะกอนประกอบขึ้นด้วยระบบแผ่นกัน (baffle system) ซึ่งเอียงมุมประมาณ 50 องศาอยู่ส่วนบนของถังปฏิกริยาทำหน้าที่แยกของเหลว ก๊าซและตะกอนจุลินทรีย์ (liquid-gas-sludge separation) ออกจากกัน

น้ำเสียที่ต้องการบำบัดจะไหลเข้าส่วนล่างของถังปฏิกริยาจะสัมผัสกับขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง ซึ่งเรียกขึ้นตะกอนจุลินทรีย์นี้ว่าขึ้นตะกอนล่าง (sludge bed) จุลินทรีย์ที่อยู่ในขึ้นตะกอนล่างจะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดเซลล์ของจุลินทรีย์และก๊าซต่าง ๆ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเกาะอยู่ตามตะกอนจุลินทรีย์ ความเร็วของน้ำเสียและฟองก๊าซที่ไหลขึ้นในถังปฏิกริยาจะพาเอาตะกอนจุลินทรีย์ในขึ้นตะกอนล่างลอยขึ้นสู่ด้านบน (ดูรูปที่ 2.3) ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอย ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นต่ำกว่าขึ้นตะกอนล่าง และเรียกขึ้นตะกอนจุลินทรีย์นี้ว่าขึ้นตะกอนลอย (sludge blanket) ระหว่างที่น้ำเสียไหลขึ้นสู่ส่วนที่เป็นถังตกตะกอน สารอินทรีย์ยังคงถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในขึ้นตะกอนลอย การลอยขึ้นของน้ำเสียที่มีตะกอนจุลินทรีย์และก๊าซต่าง ๆ เกาะรวมกัน จะกระทบกับระบบแผ่นกันซึ่งจะแยกตะกอนจุลินทรีย์ให้กลับเข้าสู่ถังหมักอีกครั้ง จากรูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของส่วนที่แยกของเหลว ตะกอนจุลินทรีย์และก๊าซ จะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์และก๊าซไหลขึ้นสู่ถังตกตะกอนจะกระทบส่วนที่ 1 และ 2 ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันมิให้ก๊าซที่ติดมากับตะกอนจุลินทรีย์ไหลเข้าสู่ส่วนที่ 3 และแยกก๊าซออกจากน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ ก๊าซที่ถูกแยกออกมาจะลอยขึ้นสู่ส่วนที่เก็บก๊าซ น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกแยกออกมาจะไหลเข้าสู่ส่วนที่ 3 และส่วนที่ 4 ซึ่งมีลักษณะการไหล

ของน้ำเป็นแบบไหลตามยาว (plug flow) ทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ (22) น้ำเสียจะไหลออกจากถังปฏิกิริยากลายเป็นน้ำออก ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะตกตะกอนสู่กันถังตกตะกอน หรือส่วนที่ 4 และจมตัวลงสู่ ส่วนที่เป็นถังหมักอีกครั้งหนึ่ง โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (gravity force) ซึ่งมีส่วนที่ 1 เป็นตัวป้องกันมิให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในส่วนที่เป็นถังหมักมารบกวนการตกตะกอนในส่วนที่ 4 ได้ นอกจากนี้ตะกอนจุลินทรีย์ยังสามารถที่จะตกตะกอนสู่ชั้นตะกอนล่าง โดยการเกิดสภาวะการไหลวกกลับ (backmix flow) ซึ่งเกิดจากการลอยขึ้นของก๊าซและการไหลขึ้นของน้ำเสีย ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในถังหมักหลุดออกไปกับน้ำ ออกน้อยลง (23)



- บ - น้ำเสีย
- ค - ตะกอนจุลินทรีย์
- ก - ก๊าซ

รูปที่ 2.4 ลักษณะทั่วไปของถังปฏิกิริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (1, 24)

013240

2.4 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น

กระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา แบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระชนิดหนึ่งที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์สองพวก ซึ่งทำหน้าที่สร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทนทำงานอย่างต่อเนื่องกัน และอยู่ในสภาวะที่สมดุลกันด้วย พารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการนี้แบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อม และความต้องการของจุลินทรีย์ เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ ความเป็นด่าง ความเข้มข้นของกรดเวลาไหล อาหารเสริม สารพิษ เป็นต้น ส่วนพารามิเตอร์อีกประเภทหนึ่งนั้นคือ พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน เช่น ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading) ภาระบรรทุกการไหลของน้ำ (hydraulic loading) การเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์ (sludge retention) เป็นต้น

2.4.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมและความต้องการของจุลินทรีย์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อม และความต้องการของจุลินทรีย์ สำหรับกระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น จะต้องรักษาระดับให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและทำให้จุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งต้องอาศัยความรู้ทางชีวเคมีและชีววิทยาของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศเข้าช่วย พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อม และความต้องการของจุลินทรีย์ที่สำคัญ ๆ มีดังนี้

2.4.1.1 พีเอช

ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของมีเทนแบคทีเรียจะอยู่ประมาณ 7 ถ้าค่าพีเอชมีค่าต่ำ หรือสูงกว่า 7 มากเกินไปจะยับยั้งการเจริญเติบโตของมีเทนแบคทีเรีย McCarty (9) พบว่า พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีพของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6 - 7.6 ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 จะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นค่าพีเอชที่นิยมใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบจะอยู่ระหว่าง 6.8 - 7.2 Dague และผู้ร่วมงาน (25) ได้ทำการทดลองพบว่าค่าพีเอชของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศต่ำกว่า 6.5 จะยับยั้งการเจริญเติบโตของมีเทนแบคทีเรีย โดยไม่คำนึงถึงปริมาณความเข้มข้นของกรดเวลาไหล นอกจากนี้ยังพบว่าถังหมักแบบไร้อากาศที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 และปริมาณความ

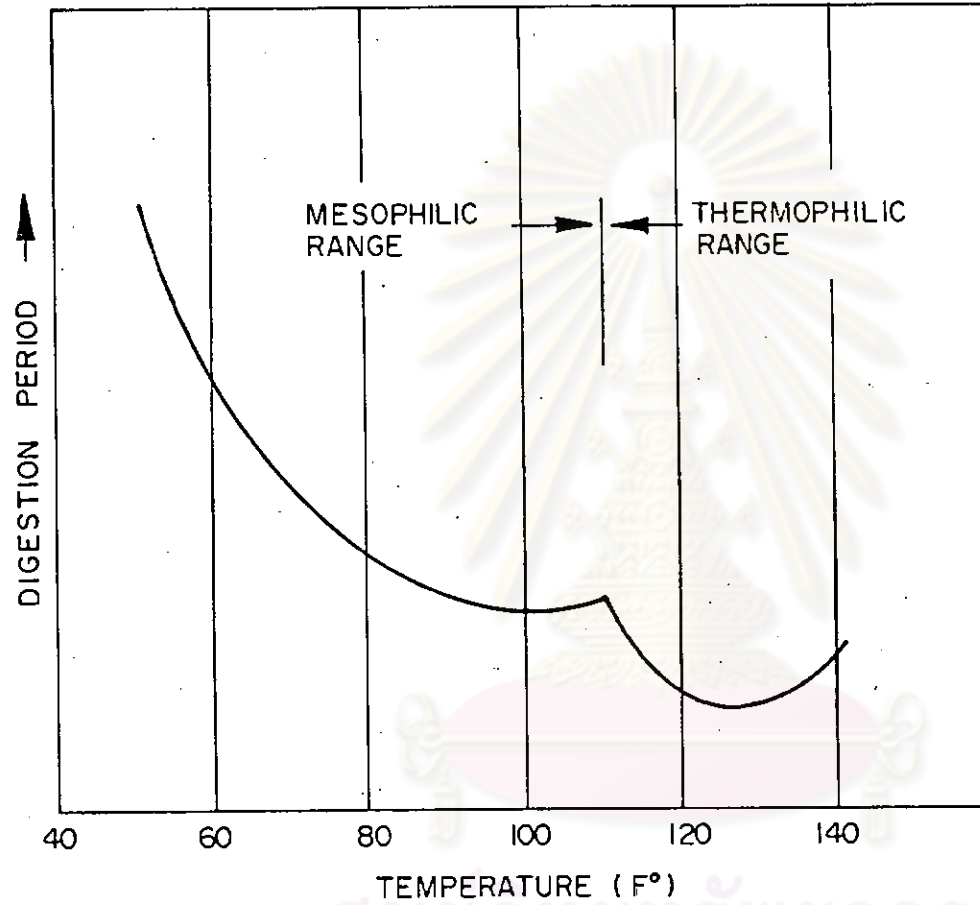
เข้มข้นของกรดโวลลาโทลล์ประมาณ 5,000 มก./ล. จะไม่มีก๊าซเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ ถังหมักแบบไร้อากาศที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.8 - 7.2 และมีปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลลาโทลล์ เท่าเดิมพบว่ามีการเกิดก๊าซขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลลาโทลล์เพิ่มจากเดิมไปเป็น 7,000 มก./ล. และค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.8 - 7.2 พบว่าก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าค่าพีเอชของระบบมีค่าต่ำกว่า 6.2 จะทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จำนวนมากภายในระบบ ซึ่งเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อมีเทนแบคทีเรีย ทำให้ระบบเสถียรและการทำงานของระบบล้มเหลว สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ถึงแม้จะอยู่ในช่วง 4.5 ถึง 5.0 ก็ไม่มีผลต่อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ (21)

2.4.1.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้ เป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกอยู่ระหว่าง 30°C ถึง 35°C เรียกอุณหภูมิช่วงนี้ว่าช่วง mesophilic ส่วนอีกช่วงหนึ่งอยู่ระหว่าง 55°C ถึง 60°C เรียกอุณหภูมิช่วงนี้ว่าช่วง thermophilic

Rudolf (26) ได้ทำการทดลอง พบว่า ปริมาตรของก๊าซที่ผลิตขึ้นได้จากตะกอนจำนวนหนึ่งนั้น จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก แต่อัตราการเกิดก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ Maly และ Fadrus (27) ได้ทำการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลาย โดยใช้ถังหมักแบบเตี่ยว (simple batch) ย่อยสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 20°C , 30°C และ 50°C พบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการย่อยสลายสารโปรตีน และอัตราการเกิดก๊าซจะเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.5 แสดงผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลาย (28). Ono (29) ได้รายงานไว้ที่อุณหภูมิ 54°C ถังหมักแบบไร้อากาศ สามารถที่จะรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เป็น 2.4 เท่าของระบบที่มีอุณหภูมิ 38°C และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิในถังหมักแบบไร้อากาศอย่างกะทันหันแม้เพียง 2°C - 3°C จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่ออัตราการเกิดก๊าซ (30)

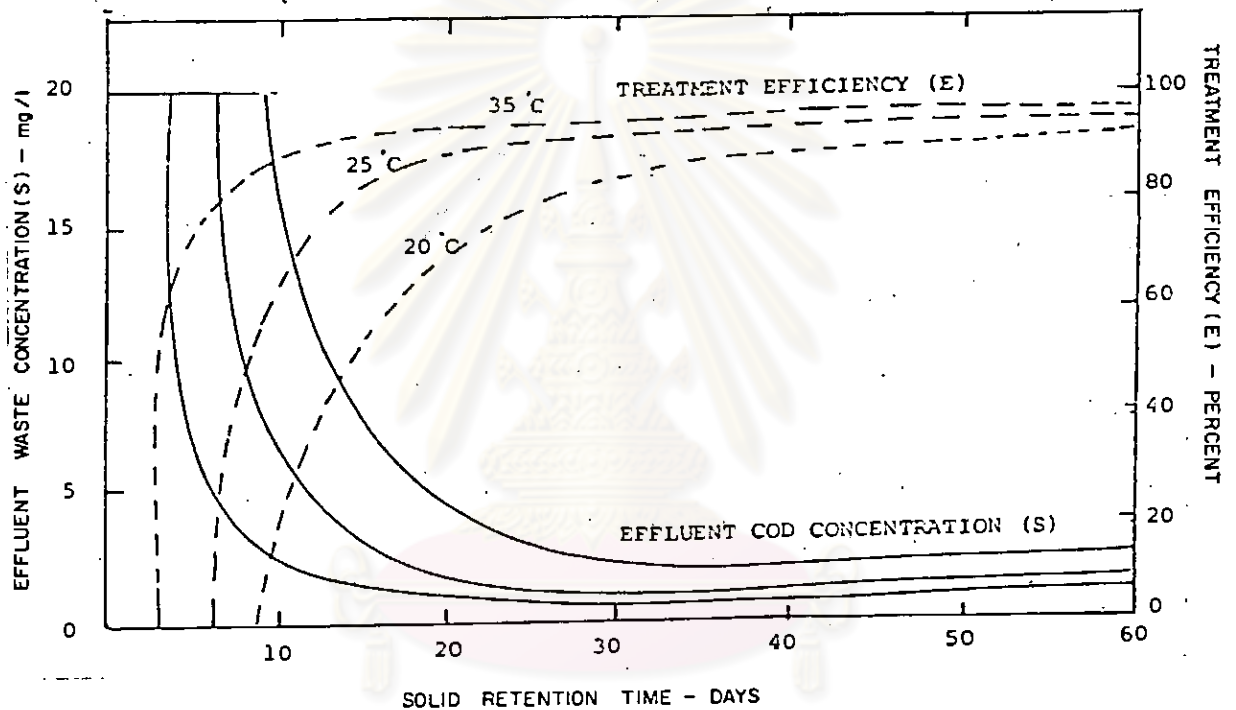
Wiegant และ Lettinga (31) พบว่าที่อุณหภูมิช่วง thermophilic ถังปฏิกรณ์ขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ชนิดกระบวนการขั้นตอนเดียว (one-step process) สามารถรับน้ำเสีย ซึ่งใช้สารละลายกลูโคส คิดเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ได้เท่ากับ 40 กก. ซีไอดี ต่อ ลบ.ม. ของถังปฏิกรณ์ต่อวัน



รูปที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อระยะเวลาย่อยสลายสารอินทรีย์ (28)

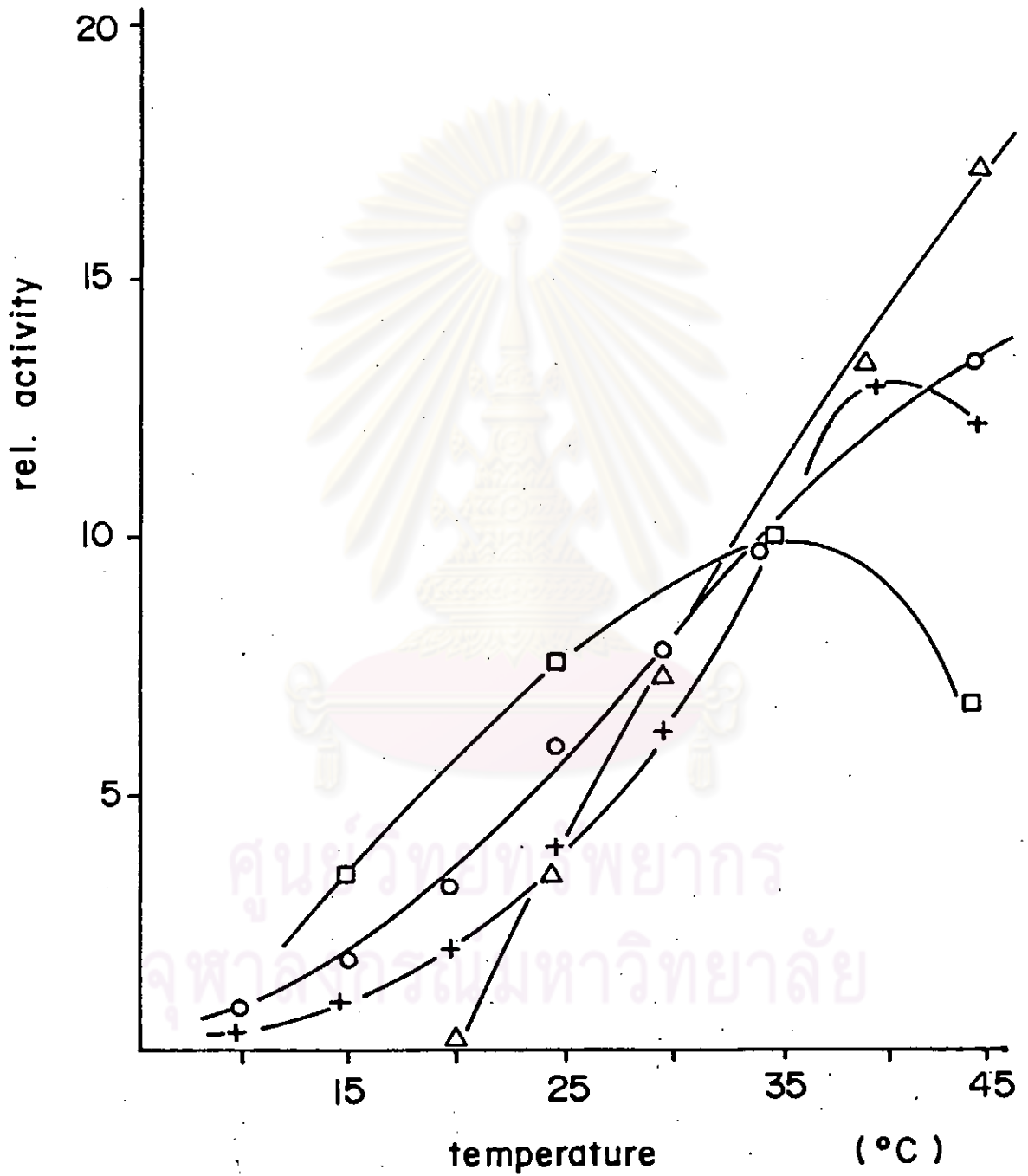
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lawrence และ Mc Carty (32) พบว่าจุดหมกและระยะเวลาเก็บกักตะกอน (solid retention time) จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ดังรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าเมื่อจุดหมกเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเก็บกักตะกอนจะลดลง โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียยังเท่าเดิมอยู่ หรือถ้าจุดหมกลดลง ระยะเวลาในการเก็บกักตะกอนจะเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เท่าเดิม



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของจุดหมกกับระยะเวลาการเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไร้อากาศ (32)

G. Lettinga และผู้ร่วมงาน (21) ได้รวบรวมผลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทำงานของจุลินทรีย์ เพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง $10^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$ จะเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในถังหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งย่อยสลายสารอาหารชนิดต่าง ๆ (21)

2.4.1.3 สภาพความเป็นกรดและด่าง

สภาพความเป็นกรดและด่าง เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียล่องพวกที่กล่าวมาแล้วทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลย์ อัตราการสร้างกรดของแบคทีเรียที่สร้างกรดและอัตราการใช้กรดเพื่อสร้างก๊าซมีเทนของมีเทนแบคทีเรียจะเท่ากัน แต่ถ้าเกิดการสะสมของกรดโวลาทิลเป็นจำนวนมากในระบบจะทำให้พีเอชต่ำ ซึ่งเป็นกรยับยั้งการทำงานของมีเทนแบคทีเรีย ทำให้ระบบเสียสมดุลย์และล้มเหลว โดยปกติในถังหมักแบบไร้อากาศ ควรจะมีปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาทิลประมาณ 50-500 มก./ล. คิดอยู่ในรูปของกรดอะซิติก หากปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาทิลมีค่ามากกว่า 2,000 มก./ล. คิดอยู่ในรูปของกรดอะซิติก แล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง (33)

กรดโวลาทิลที่อยู่ในถังหมักแบบไร้อากาศแบ่งออกได้เป็นสองพวก คือ พวกกรดโวลาทิลที่แตกตัว (ionized volatile acid) และพวกกรดโวลาทิลที่ไม่แตกตัว (unionized volatile acid) ปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาทิลที่ไม่แตกตัว (HS) จะเป็นฟังก์ชันของพีเอช (H^+) และปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาทิลทั้งหมด (S) (34) ดังสมการที่ 2.6

$$HS = \frac{[H^+][S]}{K_a} \quad (2.6)$$

โดยที่ K_a เป็นค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดโวลาทิล (ionized constant of volatile acid)

จากสมการ 2.6 จะเห็นว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาทิลทั้งหมดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าพีเอชลดลงหรือปริมาณความเข้มข้นของโปรตรอนเพิ่มขึ้น Kotze และผู้ร่วมงาน (30) พบว่า โมเลกุลของกรดอ่อนและด่างอ่อนที่ไม่แตกตัวเป็นอ็อน (unionized weak acid and weak base) สามารถผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้รวดเร็วมาก ดังนั้นกรดโวลาทิลที่ไม่แตกตัวเป็นอ็อนจึงผ่านเข้าไปในจุลินทรีย์ได้ง่าย และทำให้พีเอชภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ลดลง ซึ่งเป็นเหตุให้จุลินทรีย์ตายลง นอกจากนี้ในกรณีของด่างอ่อนที่ไม่แตกตัวเป็นอ็อน จะทำให้พีเอชภายในเซลล์ของจุลินทรีย์สูงขึ้น เป็นเหตุให้จุลินทรีย์ตายลง

สภาพความเป็นต่าง ภายในถังหมักแบบไร้อากาศ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต จะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ให้แก่ระบบ ถ้าอัตราส่วนของกรดโวลาคไทล์ต่อสภาพความเป็นต่างในรูปของไบคาร์บอเนต มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบต่ำมาก และพีเอชสามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็วถึงแม้ปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาคไทล์เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม ส่วนใหญ่ความเป็นต่างในรูปไบคาร์บอเนต เกิดจากเกลือแอมโมเนีย เช่น แอมโมเนียไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) และแอมโมเนียมอะซิเตท ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารประกอบพวกโปรตีน ค่าความเป็นต่างไบคาร์บอเนต (bicarbonate alkalinity) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7 (35,36)

$$\text{BA} = \text{TA} - (0.85) (0.833) \text{TVA} \quad (2.7)$$

โดยที่

BA = ปริมาณความเข้มข้นของต่างไบคาร์บอเนต (มก./ล. ในรูปของ CaCO_3)

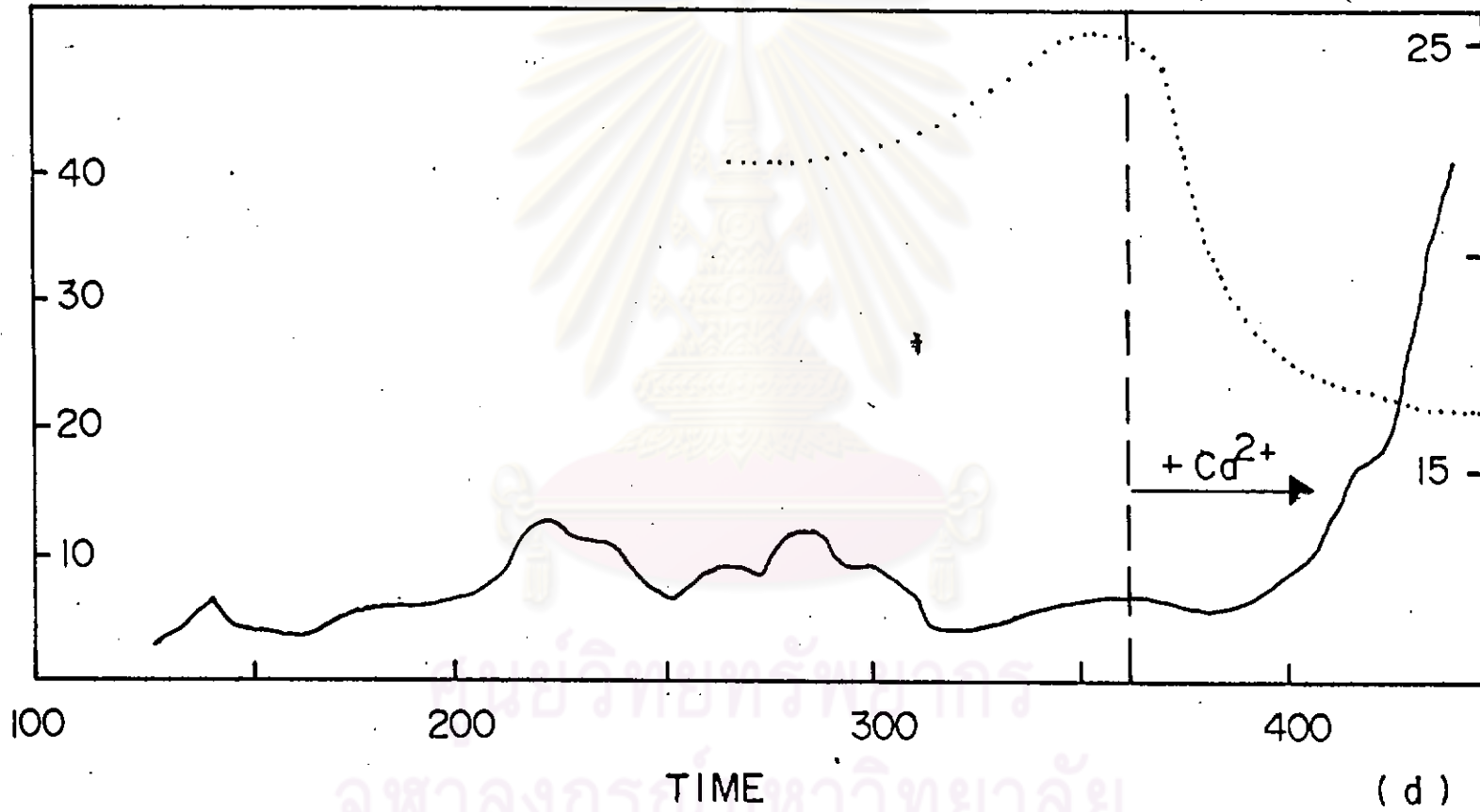
TA = ปริมาณความเข้มข้นของต่างทั้งหมด (มก./ล. ในรูปของ CaCO_3)

TVA = ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของกรดโวลาคไทล์ (มก./ล. ในรูปของ CH_3COOH)

ในบางครั้งถ้าภายในถังหมักแบบไร้อากาศมีปริมาณความเป็นต่างไม่เพียงพอที่จะควบคุมพีเอช ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารเคมี เข้าไปเพื่อให้ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงขึ้น สารเคมีที่มีอยู่หลายประเภท เช่น พวกต่างแก่ สารพวกไบคาร์บอเนต และสารพวกคาร์บอเนต แต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป Kirsch และ Sykes (37) แนะนำว่าโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นสารเคมีตัวที่ดีที่สุดในการควบคุมพีเอช เพราะว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถละลายน้ำได้ดี และให้ความเป็นต่างไบคาร์บอเนตแก่ระบบโดยตรง แต่จะมีราคาแพงกว่าสารเคมีตัวอื่น ๆ Lettinga และผู้ร่วมงาน (21) ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] เป็นบัฟเฟอร์แทนโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ป่าบัตน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบ ปรากฏว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถรักษากำลังบัฟเฟอร์ได้ดี และยังทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีขึ้นมาก ซึ่งเป็นการกักตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในถังปฏิกิริยาให้มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ระบบมีความสามารถในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น รูปที่ 2.8

ORGANIC LOADING
(kg / m³ · d)

SVI
(ml / g)

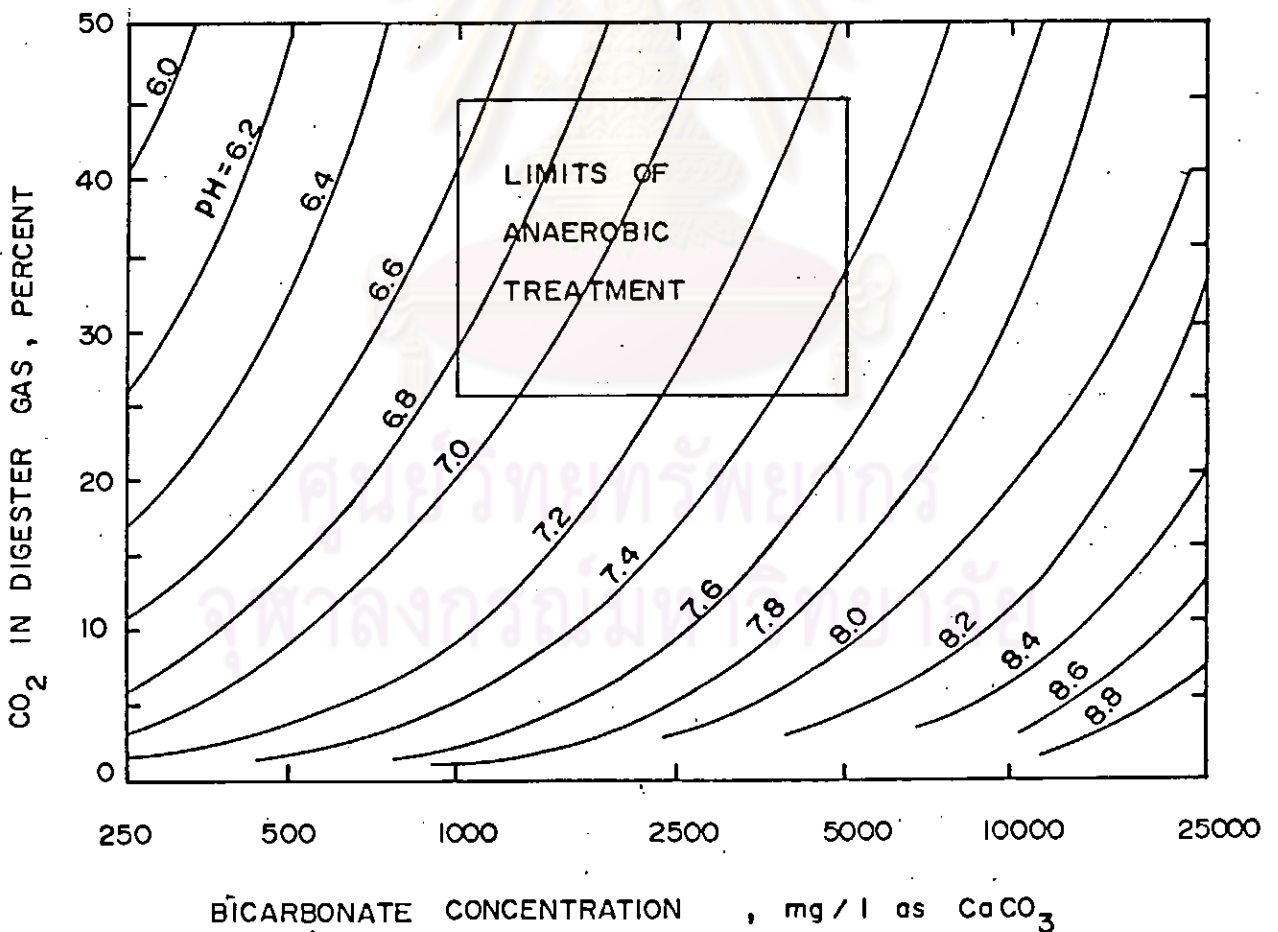


รูปที่ 2.8 ผลของการเติม Ca²⁺ ที่มีต่อความสามารถในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์และค่าดัชนีของการตกตะกอน (21)

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงพีเอชในถังหมักแบบไร้อากาศไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นต่าง และปริมาณความเข้มข้นของกรดโวลาคิลเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอีกด้วย โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช สภาพความเป็นต่างไบคาร์บอเนต และปริมาณร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.8 (35)

$$pH = 5.14 - \log (\% CO_2) + \log (HCO_3^-) \quad (2.8)$$

Mc Carty (9) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณความเข้มข้นของต่างไบคาร์บอเนต ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณความเข้มข้นของต่างไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมสำหรับการหมักแบบไร้อากาศไม่ควรน้อยกว่า 1,000 มก./ล. ในรูปของ $CaCO_3$ เพื่อจะรักษาพีเอชไม่ให้อ่างลงจนเกิดอันตรายต่อจุลินทรีย์ในระบบ



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณความเข้มข้นของ bicarbonate alkalinity ที่อุณหภูมิ 95°F (9)

2.4.1.4 อาหารเสริม

อาหารเสริมที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้แก่ ธาตุคาร์บอน ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัสและอื่น ๆ Lettinga และผู้ร่วมงาน (21) แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นอาหารเสริมอย่างหนึ่ง ให้แก่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยีสตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบสูงขึ้น Mc Carty (9) กล่าวว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอัตราส่วน $BOD_L : N : P$ อย่างน้อยที่สุด เท่ากับ $100 : 1.1 : 0.2$ Speece และ Mc Carty (38) พบว่าจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจน ต้องการธาตุไนโตรเจนประมาณ 0.106 เท่าของน้ำหนักเซลล์ และต้องการธาตุฟอสฟอรัสประมาณ 0.143 เท่าของความต้องการธาตุไนโตรเจน Sanders และ Bloodgood (39) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณธาตุไนโตรเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในสารอาหารที่ป้อน เข้าสู่ถังหมักแบบไร้อากาศ พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณธาตุคาร์บอน และไนโตรเจนในสารอาหารเท่ากับ 16 ระบบจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าอัตราส่วนนี้น้อยจะทำให้เกิดแอมโมเนีย เป็นจำนวนมาก ทำให้จุลินทรีย์ตายลงในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยจะทำให้ระบบขาดธาตุไนโตรเจน และระบบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณธาตุไนโตรเจนและอัตราส่วนปริมาณธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน โดยน้ำหนักที่มีอยู่ในสารอาหารชนิดต่าง ๆ

2.4.1.5 สารพิษ

สารพิษที่เกิดขึ้นในระบบหมักแบบไร้อากาศ อาจจะเป็นพิษโดยตรงหรือยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณความเข้มข้นของสารพิษนั้น ๆ Mc Carty (9) ได้รายงานว่สารพิษบางชนิด หากมีปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมจะช่วยกระตุ้นให้จุลินทรีย์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ สารพิษเหล่านี้ได้แก่ กรดโวลาคิล กรดอะซิติก กรดอินทรีย์ โลหะหนัก แอมโมเนีย ฮัลไฟด์ เป็นต้น ระดับของความเป็นพิษของสารพิษที่กล่าวข้างต้นจะมากหรือน้อยจะแตกต่างกันออกไป สารพิษบางชนิดได้แก่ อีออนของซิลยาไนต์ (CN^-) และสารประกอบพวกคลอรีนได้แก่ CCl_4 , $CHCl_3$ และ CH_2Cl_2 สารพิษพวกนี้สามารถทำให้จุลินทรีย์ตายได้ ถึงแม้จะปริมาณความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ตารางที่ 2.6 ปริมาณร้อยละของธาตุไนโตรเจนและอัตราส่วน ปริมาณธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน โดยน้ำหนักที่มีอยู่ในสารอาหารชนิดต่าง ๆ (20)

Material	N (%) (Total N)	C/N
Animal Wastes		
Urine	15-18	0.8
Blood	10-14	3
Fish scraps	6.5-10	5.1
		(nonlignin carbon)
Mixed slaughterhouse wastes	7-10	2
Poultry manure	6.3	-
Sheep manure	3.8	-
Pig manure	3.8	-
Horse manure	2.3	25
Cow manure	1.7	18
Farmyard manure (average)	2.15	14
Nightsoil	5.5-6.5	6-10
Plant Wastes		
Young grass clippings (hay)	4.0	12
Grass clippings (average mixed)	2.4	19
Purslane	4.5	8
Amaranthus	3.6	11
Cocksfoot	2.6	19
Lucerne	2.4-3.0	16-20
Seaweed	1.9	19
Cut straw	1.1	48
Flax waste (phormium)	1.0	58
Wheat straw	0.3	128
Rotted sawdust	0.25	208
Raw sawdust	0.1	511
Household Wastes		
Raw garbage	2.2	25
Bread	2.1	-
Potato tops	1.5	25
Paper	nil	-

1) พิษของกรดเวลาไหล

กรดเวลาไหลที่ประมาณความเข้มข้นสูง ๆ จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในถังหมักแบบไร้อากาศทำให้จุลินทรีย์เกิดเสียสมดุล และทำให้ระบบล้มเหลว อย่างไรก็ตามถ้ากำลังปั๊มเฟอร์ (buffer capacity) ภายในถังหมักสูงพอที่จะรักษาพีเอช ให้ใกล้เคียง 7 หรือเท่ากับ 7 ปรากฏว่า กรดเวลาไหลที่มีประมาณความเข้มข้นสูงถึง 10,000 มก./ล. ในรูปของกรดอะซิติก จะไม่เป็นพิษโดยตรงต่อแบคทีเรีย (40) Stephan (41) ได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกรดเวลาไหลที่มีต่อความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น (Upflow reactor) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นถ้าหากกำลังปั๊มเฟอร์ภายในถังหมักไม่เพียงพอ จะทำให้พีเอชต่ำลง และแบคทีเรียจะทนอยู่ไม่ได้ พิษของกรดเวลาไหลสามารถแก้ไขได้โดย การเติมสารปรับสภาพ เช่นโซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น และเพิ่มระยะเวลาพักน้ำเสีย ภายในระบบให้นานขึ้นหรือลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์

2) พิษของเกลืออนินทรีย์

เกลือของสารอนินทรีย์ เช่น เกลือของธาตุ อลคาไลน์ (alkali) และอลคาไลน์เอิร์ท (alkali earth) ได้แก่เกลือของธาตุโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เกลือของสารอนินทรีย์เหล่านี้สามารถแตกตัวให้อิออนบวก ซึ่งเป็นพิษมากกว่า อีออนลบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอีออนบวก ด้วยว่ามีมากหรือน้อยเพียงใด Mc Carty & Mc Kinney (42) และ Kugelman & Mc Carty (33) ได้สรุปผลของปริมาณอีออนบวกของเกลืออนินทรีย์ ที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 จากตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าความเป็นพิษของอีออนบวกแต่ละชนิดจะรุนแรงไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับจำนวนวาเลนซี (valency) และน้ำหนักอะตอมของสารอนินทรีย์ ถ้าสารอนินทรีย์มีวาเลนซีเท่ากับ 2 จะมีพิษมากกว่าสารอนินทรีย์ที่มีวาเลนซีเท่ากับ 1 ยกตัวอย่างเช่น พิษของ Ca^{+2} และ Mg^{+2} จะมากกว่าพิษของ Na^{+} และ K^{+} ถึง 10 เท่า นอกจากนี้ Lettinga และผู้ร่วมงาน (21) ได้รายงานว่ปริมาณความเข้มข้นของเกลือของสารอนินทรีย์ ได้แก่แมกนีเซียม (Mg^{+2}) แคลเซียม (Ca^{+2}) และแบเรียม (Ba^{+2}) ที่เหมาะสมจะทำให้ความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ปริมาณไอออนบวกที่มีผลต่อการทำงานของลูตินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (9)

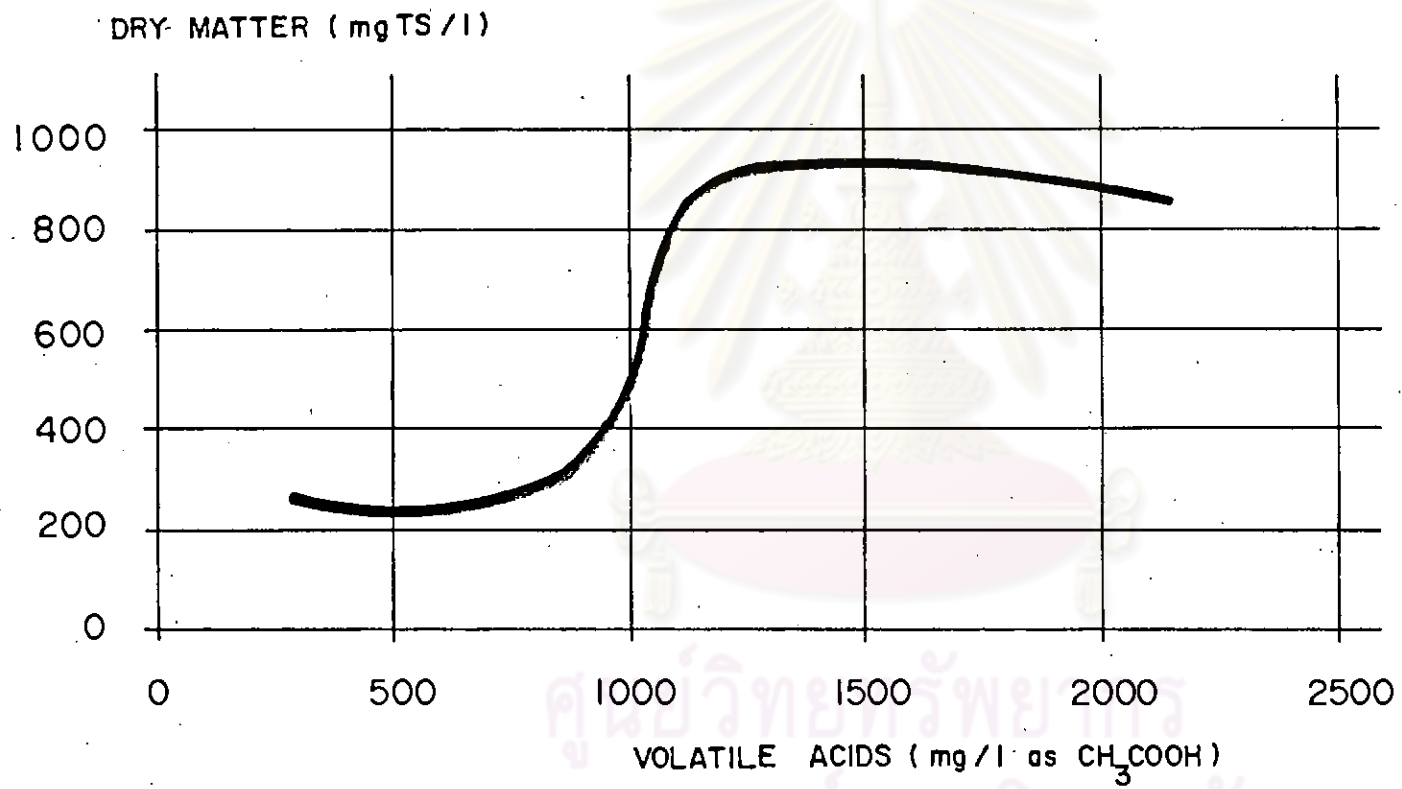
Cation	Unit	Stimulatory	Moderately Inhibitory	Strongly Inhibitory
Sodium (Na^+)	mg/l	100 - 200	3,500-5,500	8,000
Potassium (K^+)	mg/l	200 - 400	2,500-4,500	12,000
Calcium (Ca^{2+})	mg/l	100 - 200	2,500-4,500	8,000
Magnesium (Mg^{2+})	mg/l	75 - 150	1,000-1,500	3,000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 ปริมาณไอออนบวกของธาตุซึ่งมีวาเลนซ์เท่ากับสองที่มีผลต่อความสามารถในการตกตะกอนอนุพันธ์ในถังปฏิกริยาขึ้นตะกอนอนุพันธ์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (21)

Cation added	Concentration cation added	SS in effluent			
		10	20	40	100
Mg ²⁺		750	680	580	580
Ca ²⁺		480	365	140	120
Ba ²⁺		550	350	160	30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



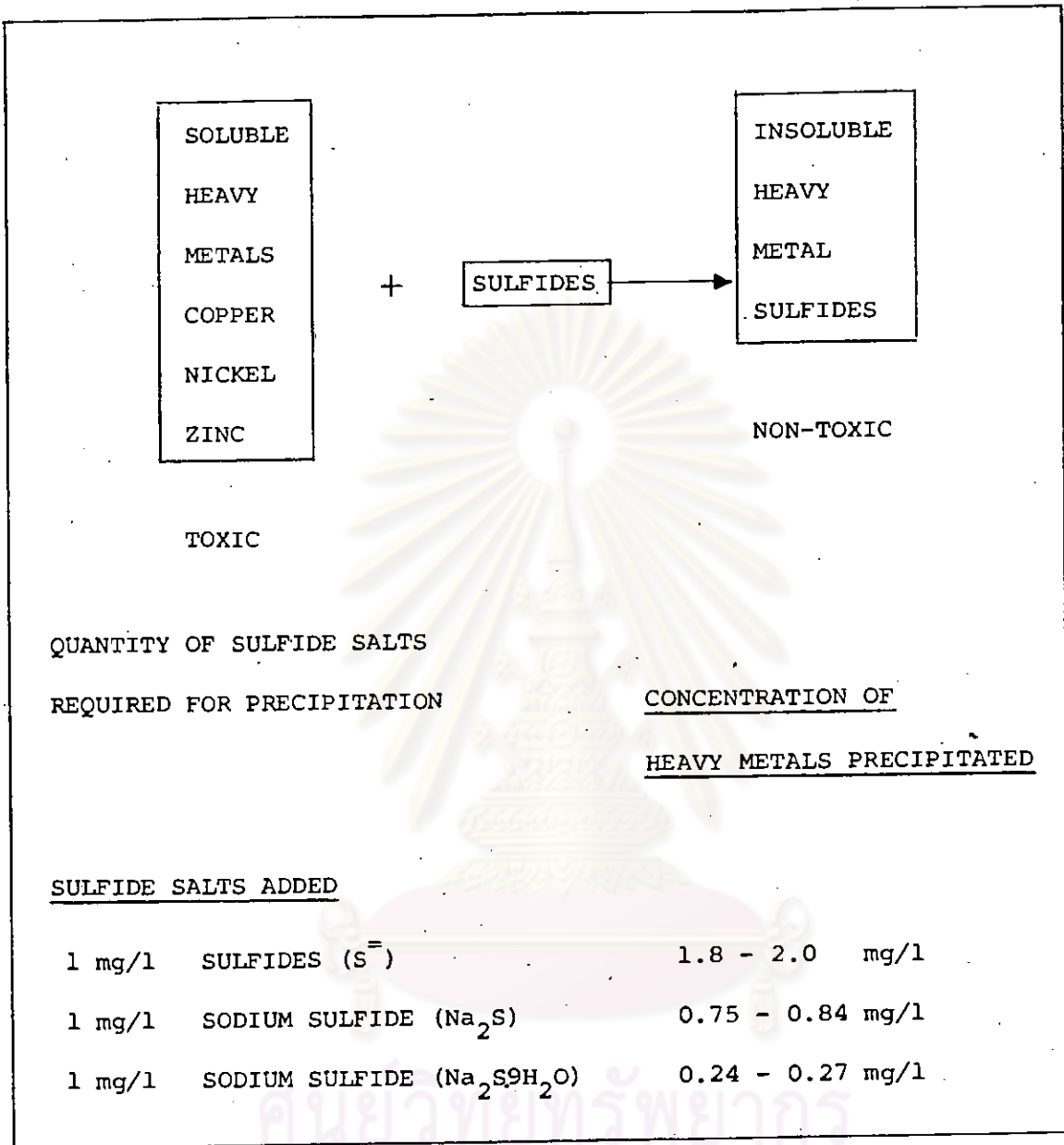
รูปที่ 2.10 ผลของกรดโวลาทิลที่มีต่อความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ ในกระบวนการย่อยสลาย
 สารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (41)

3) พิษของโลหะหนัก

โลหะหนักที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมแบบไร้อากาศได้แก่ สังกะสี ทองแดง พรอท ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักเหล่านี้จะยับยั้งการเจริญเติบโต หรืออาจทำให้ตายได้ อย่างไรก็ตามโลหะหนักที่เป็นพิษจะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งโลหะหนักจะแตกตัวเป็นไอออนเท่านั้น Mc Carty (9) พบว่าพิษของโลหะหนักจะรุนแรงมากน้อยเท่าใด ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักนั้น ตัวอย่างเช่น เหล็ก และ อะลูมิเนียม จะไม่เป็นพิษ เนื่องจากเกลือของโลหะทั้งสอง มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเองในสิ่งแวดล้อมแบบไร้อากาศ เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักได้เกลือซัลไฟด์ ซึ่งไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษ จากการคำนวณ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า 1 กรัมของซัลไฟด์ สามารถตกตะกอนโลหะหนัก ได้ 1.8 - 2.0 กรัม ในกรณีซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเองในสิ่งแวดล้อมแบบไร้อากาศ ไม่เพียงพอที่จะทำให้โลหะหนักตกตะกอนได้ตามที่ต้องการ สามารถแก้ไขได้โดยเติมเกลือ ซึ่งละลายน้ำแล้วให้ซัลไฟด์ เช่น เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมซัลไฟด์ เป็นต้น นอกจากนี้โลหะหนักที่มีวาเลนซ์สูงจะมีพิษมากกว่าโลหะหนักที่มีวาเลนซ์ เช่น Cr^{+6} มีพิษมากกว่า Cr^{+3} ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณของโลหะหนักที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศหมดประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.9 ปริมาณของโลหะหนักที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศหมดประสิทธิภาพ

Heavy Metals	Unit	Concentration	Reference
Zinc (Zn^{2+})	mg/l	163	Hosey & Hughes (1975)
Cadmium (Cd^{2+})	"	180	"
Copper (Cu^{2+})	"	170	"
Ferrous (Fe^{2+})	"	1,750	"
Chromium (Cr^{3+})	"	530	"
Chromium (Cr^{6+})	"	450	"
Mercury (Hg^{2+})	"	1,365	"



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการทำลายพิษของโลหะหนัก โดยซัลไฟด์ (S^{2-}) ในสภาวะไร้ออกซิเจน
 อีลระ (9)



4) พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในถังหมักแบบไร้อากาศเกิดจากการย่อยสลายสารพวกที่ประกอบด้วยไนโตรเจนเช่น โปรตีน หรือปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียอาจจะอยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) หรือ แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชภายในถังปฏิกรณ์ ดังสมการที่ 2.9



ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกรณ์ในสมการ 2.9 มีแนวโน้มที่จะเกิดก๊าซแอมโมเนียมาก ซึ่งเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียมไอออน (9) ตารางที่ 2.10 แสดงปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจน ที่มีผลต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ตารางที่ 2.10 ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (Mc Carty 1964)

Ammonia Nitrogen	Unit	Affect on Anaerobic Treatment
100 - 200	mg/l	Beneficial
200 - 1,000	"	No Adverse Effect
1,500 - 3,000	"	Inhibitory at High pH Value
>3,000	"	Toxic

5) พิษของซัลไฟด์

ซัลไฟด์ที่มีอยู่ในถังหมักแบบไร้อากาศ อาจมีอยู่ในน้ำเสีย หรือเกิดจากการย่อยสลายสารพวกซัลเฟต ที่มีอยู่ในน้ำเสีย หรือเกิดจากการย่อยสลายสารพวก โปรตีน ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในถังหมักอาจจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ที่ละลายอยู่ในน้ำได้ หรือไม่ละลายน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับอิออนบวกของโลหะที่รวมอยู่ ถ้ารวมอยู่กับพวกโลหะหนักก็จะตกตะกอนลงมา ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) Mc Carty (9) พบว่าแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระสามารถทน ซัลไฟด์ที่ละลายน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้น 50-100 มก./ล. ได้ และที่ปริมาณความเข้มข้นมากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย

2.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแต่ละชนิดจะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย และกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ภายในกระบวนการนั้น ๆ สำหรับกระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะต้องปราศจากสารพิษ และต้องปรับสภาพของน้ำเสียให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในระบบ เช่น ค่าพีเอช สภาพความเป็นกรดต่าง อาหารเสริมเป็นต้น ส่วนกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ภายในระบบนอกจากจะรักษาสภาพสมดุลของจุลินทรีย์ที่สร้างกรดและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน แล้วยังต้องรักษาค่าจำนวนจุลินทรีย์ในระบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ พารามิเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาก็คือ ความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ (sludge settleability) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (organic loading rate) และอัตราการระบรทุกการไหลของน้ำ (hydraulic loading rate) ดังนั้นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ควบคุมการทำงาน ของกระบวนการขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น คือ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ และ อัตราการระบรทุก การไหลของน้ำ

อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ การตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์และการเกิดก๊าซในถังปฏิกริยา น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะต้องมีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่ำกว่าอัตราสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์ของตะกอนจุลินทรีย์ Lettinga และผู้ร่วมงาน (43) พบว่าตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนล่างจะขยายตัว เล่มที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่ำ ซึ่ง เกิดจากก๊าซที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาส่วนใหญ่จะถูก

ตกอยู่ในชั้นตะกอนล่าง โดยน้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์และความหนาแน่นของตะกอนจุลินทรีย์ แต่ชั้นตะกอนล่างจะหดตัวลง เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้น (การเกิดก๊าซจะเพิ่มขึ้นด้วย) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ยังไม่มีการทดลองที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่าใดจึงจะทำให้ชั้นตะกอนล่างเกิดการขยายหรือหดตัวขึ้น การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้ก๊าซเกิดเพิ่มขึ้น, การสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียบกับตะกอนจุลินทรีย์เกิดมากขึ้น, ก๊าซที่ถูกดักอยู่ในชั้นตะกอนล่างเกิดน้อยลง, ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนล่างเกิดเพิ่มขึ้น, ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์บริเวณพื้นที่รอบตัวของชั้นตะกอนล่าง และชั้นตะกอนลอยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากแรงที่เกิดจากการลอยขึ้นอย่างรวดเร็วของก๊าซ นอกจากนี้ได้มีการทดลองใช้น้ำเสียบจากโรงงานที่ไย้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบ ศึกษาการทำงานของถังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ในช่วงวันที่ทดลองระหว่าง 411 ถึง 438 พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาจะเพิ่มขึ้นด้วย และก๊าซที่เกิดเพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อการกักตะกอนจุลินทรีย์ (21)

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อการกักตะกอนจุลินทรีย์ก็คือ อัตราภาระบรรทุกการไหลของน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของการกวน (agitation intensity) ในชั้นตะกอนล่าง จากการทดลองกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) โดยใช้ถังปฏิกริยา ชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้นขนาดห้องปฏิบัติการ และการกวนในถังปฏิกริยาให้เกิดขึ้นโดยก๊าซที่เกิดขึ้นเองในถังปฏิกริยาเพียงอย่างเดียว พบว่าน้ำเสียบจะไหลผ่านช่องว่างที่เกิดขึ้นจากรอยแตกของตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนล่าง ซึ่งเป็นการไหลสัตวงจร (short circuit) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการกระจายทางน้ำเข้า (feed inlet distribution) ให้น้ำเสียบสัมผัสพื้นที่ด้านล่างของถังปฏิกริยาสำหรับโรงบำบัดน้ำเสียบจริง จุดน้ำเข้าหนึ่งจุดจะครอบคลุมพื้นที่ 5 ถึง 10 ตารางเมตร และถังปฏิกริยาต้นแบบขนาดใหญ่ (large pilot plants) จุดน้ำเข้าหนึ่งจุดควรจะครอบคลุมพื้นที่ได้ถึง 1 ถึง 2 ตารางเมตร ถ้าระบบกระจายน้ำเข้าสามารถกระจายน้ำเสียบได้ทั่ว ตลอดพื้นที่กั้นถัง จะทำให้ระบบรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง เช่น การกำจัดน้ำเสียบจากโรงงานน้ำตาลสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 30 กก. ซีโอดี ต่อลบ.ม.ของถังปฏิกริยาต่อวัน (21) เป็นต้น ถ้าหากการกวนในถังปฏิกริยาเกิดจากการใช้เครื่องกล (mechanical mixing) จะทำให้ขนาดของตะกอนจุลินทรีย์เล็กลง และเมื่ออัตราภาระบรรทุกการไหลของน้ำ จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์

ที่มีขนาดเล็กเหล่านี้ หลุดออกไปกับน้ำออก ซึ่งแก้ไขได้โดยติดตั้งถังแยกก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์ และน้ำใส (gas-solids-liquid separator) หลักการทำงานของถังนี้ได้กล่าวเอาไว้ใน หัวข้อที่ 2.3.2 แล้ว

2.5 ผลงานวิจัยถังปฏิกริยาขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่ผวนมา

Lettinga และผู้ร่วมงาน (21) เริ่มทำการค้นคว้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ขึ้นตอนเดียว (one stage anaerobic treatment) ซึ่งใช้แนวความคิดของกระบวนการ ขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1971 ถังปฏิกริยาที่ใช้ในการ ทดลองเป็นขนาดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) มีปริมาตรตั้งแต่ 2.7 ถึง 61 ลิตร สูง 0.30 ถึง 1.05 เมตร บำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิต น้ำตาล โรงงานผลิตนมผงตัดแปลง โรงงานผลิตกระดาษปัสตอง เป็นต้น มีความเข้มข้นซีโอดี 5,000-12,000 มก./ล. การทดลองได้ประสบความสำเร็จ กล่าวคือ ถังปฏิกริยาขึ้นตะกอน จุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ได้ร้อยละ 65 ถึงร้อยละ 95 ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 10-14 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาที่ก้นน้ำเสียในถังปฏิกริยา 5-48 ชั่วโมง ต่อมาในปี ค.ศ. 1975 Lettinga และผู้ร่วมงานได้ทำการศึกษាถังปฏิกริยา ขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้นขนาดต้นแบบ (pilot scale) มีความสูง 3 เมตร ปริมาตร 6 ลบ.ม. บำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำตาลและโรงงานที่ใช้มะเขือเทศ เป็นวัตถุดิบ ความเข้มข้นซีโอดี 2,000 - 16,500 มก./ล. ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพ ในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 95 ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 10-45 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.- วัน และในปี ค.ศ. 1976 Lettinga และผู้ร่วมงานได้ทำการศึกษาถังปฏิกริยาขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ ไร้อากาศแบบไหลขึ้น มีความสูง 6 เมตร ปริมาตร 30 ลบ.ม. บำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจาก โรงงานผลิตน้ำตาล พบว่าถังปฏิกริยาสามารถรับภาระบรทุกสารอินทรีย์ได้ 16.7 กก. ซีโอดี / ลบ.ม.-วัน และข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ได้ถูกนำไปใช้ออกแบบถังปฏิกริยาขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ ไร้อากาศแบบไหลขึ้นเป็นครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1977 มีความสูง 4.5 เมตร ปริมาตร 200 ลบ.ม. บำบัดสารอินทรีย์ในโรงงานผลิตน้ำตาลความเข้มข้นซีโอดี 4,000 - 5,200 มก./ล. ระยะเวลา ที่ก้นน้ำเสียในถังปฏิกริยา 6-8 ชั่วโมง ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 87 ถึงร้อยละ 95 ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 14-16 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Heertjes และ van der Meer (22) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.6 เมตร สูง 6 เมตร ปริมาตร 30 ลบ.ม. ป่าดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำตาล ความเข้มข้นซีโอดี 2,500-6,500 มก./ล. ระยะเวลาที่น้ำเสียในถังปฏิกริยา 5 ชั่วโมง ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 95 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 17.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 5 ลบ.ม./ลบ.ม.ของน้ำเสีย-วัน และร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเท่ากับ 85 นอกจากนี้ยังพบว่า ที่สภาวะไม่คงที่ลักษณะการไหลของน้ำในชั้นตะกอนล่างและชั้นตะกอนลอยเป็นแบบกวนล้มบูรณ (perfect mix) ซึ่งเกิดจากการไหลสัดทาง (short circuit) และการไหลเวียนกลับ (return flow) ส่วนถังตกตะกอนที่อยู่ด้านบนของถังปฏิกริยาจะมีลักษณะการไหลของน้ำเป็นแบบไหลตามยาว (plug flow) นอกจากนี้การขยายตัวของชั้นตะกอนล่างจาก 1.2 - 2.2 เมตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น แต่ทำให้เกิดการไหลสัดทางของน้ำเสียในชั้นตะกอนล่างมากขึ้น.

Pette และ Versprille (44) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ป่าดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่เมือง Breda ในประเทศเนเธอร์แลนด์ ความเข้มข้นซีโอดี 17,000 มก./ล. ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 96 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์โดยเฉลี่ย 15 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาดังปฏิกริยาขนาดของจริง (full scale) ปริมาตร 900-1,425 ลบ.ม. ป่าดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำตาล ความเข้มข้นซีโอดี 1,850 - 4,000 มก./ล. ระยะเวลาที่น้ำเสียในถังปฏิกริยา 4 - 5.7 ชั่วโมง ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 75 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 12 - 16.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่ถูกกำจัด และมีก๊าซมีเทนอยู่ร้อยละ 80

Pette และผู้ร่วมงาน (45) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เมตร สูง 4.5 เมตร ปริมาตร 200 ลบ.ม. ป่าดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำตาล ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 500 - 1,430 มก.คาร์บอน/ล. ระยะเวลาที่น้ำเสีย 4.4 - 9.8 ชั่วโมง ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพกำจัดสารอินทรีย์ร้อยละ 91 ถึงร้อยละ 97 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.3 - 5.8 กก.คาร์บอน/ลบ.ม.-วัน นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของชั้นตะกอนล่างที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้น้ำเสียไหลสัดทาง

และเกิดบริเวณที่น้ำเสียไม่สามารถไหลผ่านได้ (dead space) เนื่องจากชั้นตะกอนล่างมีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์สูงมากจะกั้นไม่ให้น้ำเสียไหลผ่านได้

Lettinga และผู้ร่วมงาน (46,47) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.30 เมตร สูง 2 เมตร ปริมาตร 120 ลิตร ใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเม็ด (granular) จากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำตาลมาเป็นเชื้อ (seed) บำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย ความเข้มข้นซีโอดี 320-950 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 8-20°C ระยะเวลาที่น้ำเสียในถังปฏิกริยา 12 ชั่วโมง ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีร้อยละ 65 ถึงร้อยละ 85 ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.12-0.14 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่เข้าสู่ถังปฏิกริยา ร้อยละของก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 65-75 ต่อมาได้มีการศึกษาดังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศ ปริมาตร 6 ลบ.ม. ใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียของบ้านพักอาศัย บำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย ที่อุณหภูมิ 20°C ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 55 ถึงร้อยละ 75

Christensen, Gerick และ Eblen (48) ได้ศึกษาถึงปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ปริมาตร 2,200 ลบ.ม. บำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของโรงงาน Ore-Ida ซึ่งใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบ ความเข้มข้นซีโอดี 2,500 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 35°C ระยะเวลาที่น้ำเสีย 21.2 ชั่วโมง ปรากฏว่าถังปฏิกริยามีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีร้อยละ 85 ที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Fiebig และ Dellweg (49) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ปริมาตร 1.05 ลิตร เปรียบเทียบกับถังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่มีฟิล์มตรึง (upflow sludge blanket fixed film) ปริมาตร 0.80 ลิตร บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีกรดอะซิติก เป็นแหล่งคาร์บอน ปรากฏว่าถังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น สามารถผลิตก๊าซได้ 70 ล./ล.-วัน ที่ระยะเวลาที่น้ำเสีย 3.5 ชั่วโมง แต่ถังปฏิกริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่มีฟิล์มตรึง สามารถผลิตก๊าซได้ 100 ล./ล.-วัน ที่ระยะเวลาที่น้ำเสีย 2.3 ชั่วโมง และถังปฏิกริยาทั้งสองแบบนี้มีประสิทธิภาพกำจัดสารคาร์บอนได้มากกว่าร้อยละ 90 ที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์สูงที่สุด

Guiot และ van den Berg (50) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกิริยาแบบผสมระหว่างชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น กับเครื่องกรองไร้อากาศ เรียกตั้งปฏิกิริยาแบบนี้ว่า Upflow blanket filter (UBF) ตั้งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นขนาดห้องปฏิบัติการขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.6 ซม. สูง 62 ซม. ปริมาตร 4.25 ลิตร ตั้งปฏิกิริยาหนึ่งในลำต้นบนจะบรรจุตัวกลางพาลลิตที่มีพื้นที่ต่อปริมาตรเท่ากับ 235 ตร.ม./ลบ.ม. บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นซีโอดี 2,500 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 27° C และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5-51 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ปรากฏว่าตั้งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 93 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 26-34 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 7 ล./ล.-วัน ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน

Wiegant และ Lettinga (51) ได้ทำการศึกษาดังปฏิกิริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 ซม. สูง 90 ซม. ปริมาตร 5.75 ลิตร บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยกรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดิวไทริก อัตราส่วน 1 : 1 : 1 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ความเข้มข้นซีโอดี 14,650 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 55° C ระยะเวลาพักน้ำเสีย 3.2 ชั่วโมง ปรากฏว่าตั้งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดี ร้อยละ 77.6 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 104 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Cail และ Barford (52) ได้ศึกษาลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ในตั้งปฏิกิริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น เปรียบเทียบกับตั้งปฏิกิริยาแบบ upflow floc ซึ่งใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ช่วยในการตกตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานทำฟ้าน้ำมัน เป็นสารอาหาร มีความเข้มข้นซีโอดี 7,500 มก./ล. ปรากฏว่าตะกอนจุลินทรีย์ในตั้งปฏิกิริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น มีลักษณะเป็นเส้นใยประสานกันอย่างหนาแน่น (filamentous granular) ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ในตั้งปฏิกิริยาแบบ upflow floc มีลักษณะเป็นแท่ง (rod-shaped) เกาะกันเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยเพิ่มขนาด ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์และป้องกันการเกิดตะกอนจุลินทรีย์แบบเส้นใย

ในประเทศไทย ได้นำตั้งปฏิกิริยาชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น โดยใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศสองขั้นตอน บำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุรา จำนวน 12 แห่ง อยู่ที่จังหวัด เชียงใหม่ จุฬารัตน์ นครสวรรค์ กาญจนบุรี ราชบุรี ฉะเชิงเทรา สุราษฎร์ธานี

ปราสินบุรี บุรีรัมย์ อุบลราชธานี ขอนแก่น และหนองคาย น้ำเสียมีความเข้มข้นซีโอดี 100,000 มก./ล. และบีโอดี 35,000 มก./ล. ตั้งปฏิภานจะถูกแบ่งเป็นสองใบที่หน้าที่ตั้งนี้คือ ตั้งใบแรกทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลเล็กลง และสร้างกรดอินทรีย์ขึ้นมา (hydrolyse and acidification) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.15 ม. สูง 7.15 ม. ปริมาตร 450 ลบ.ม. ระยะเวลาที่น้ำเสีย 1 วัน ตั้งใบที่สองทำหน้าที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทน (methane formation) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 23 ม. สูง 7.15 ม. ปริมาตร 3,000 ลบ.ม. ระยะเวลาที่น้ำเสีย 6.7 วัน ขณะนี้ตั้งปฏิภานเหล่านี้ยังไม่ได้เริ่มการทำงาน แต่คาดว่าตั้งปฏิภานเมื่อทำงานอยู่ในสภาวะคงที่ สามารถรับภาระบำบัดทุกสารอินทรีย์ได้ 15 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีร้อยละ 70 โดยมีอัตราการสูบน้ำเสียเข้าสู่ตั้งปฏิภานทั้งสองใบ คงที่เท่ากับ 450 ลบ.ม./วัน

ส่วนประสิทธิภาพกำจัดบีโอดีร้อยละมีค่าเท่ากับ 90 ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเท่ากับ 25 ลบ.ม./ลบ.ม. ของน้ำเสีย ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 ความชื้นร้อยละ 7 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 3 ค่าของความร้อนของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 6,500 กิโลแคลอรี/ลบ.ม. ของก๊าซชีวภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย