

## ทฤษฎีและการศึกษาที่ผ่านมา

### 2.1 กรรมวิธีการผลิตสุรา (Distilleries Processes)

สุราเป็นเครื่องดื่มที่ได้จากการผสมแอลกอฮอล์ (alcohol) น้ำ และส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อให้มีรสชาติและสีแตกต่างกันไป สุราแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตรวบรวมไว้ได้ 3 ประเภท คือ

- สุราที่ผลิตจากเมล็ดธัญพืช (Grain Distilleries) ได้แก่ สุราประเภทสก๊อตวิสกี้ (Scotch Whiskey) ผลิตจากเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ เช่น ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า ข้าวบาเลย์ เป็นต้น

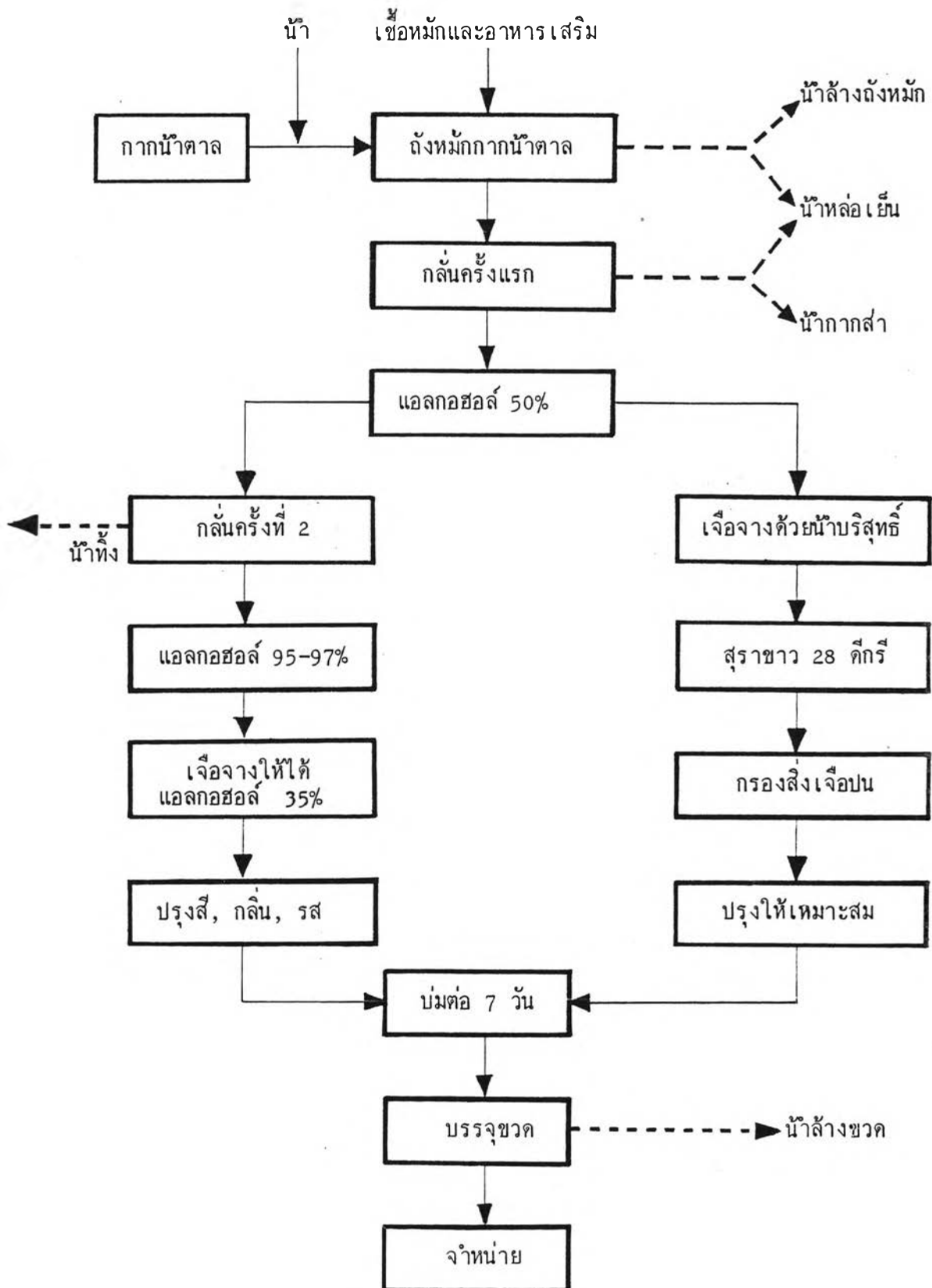
- สุราที่ผลิตจากผลไม้ (Fruit Distilleries) เช่น สับปะรด องุ่น เป็นต้น ได้แก่ สุราประเภทไวน์ (Wine) บรัันดี (Brandy) แชมเปญ (Champagne)

- สุราที่ผลิตจากกากน้ำตาล (Molasses Distilleries) เช่น สุราขาว สุราผสม รัม (Rum) เป็นต้น

กระบวนการผลิตสุรจากากน้ำตาลแบ่งได้ 4 ขั้นตอนใหญ่ ๆ (รูปที่ 2.1) ได้แก่

2.1.1 การหมักกากน้ำตาล (Fermentation) กากน้ำตาล (molasses) เป็นผลิตผลเหลือจากการผลิตของโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตกผลึกได้ต่อไปอีก มีสีน้ำตาลหรือน้ำตาลเข้ม (2) มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อัตราความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมในการหมักประมาณร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการหมักจึงต้องเจือจางกากน้ำตาลด้วยน้ำ 3 เท่า แล้วจึงใส่เชื้อหมัก (yeast) และอาหารเสริม การหมักใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง จะได้แอลกอฮอล์ร้อยละ 8-10 โดยปริมาตร (2) ส่วนผสมของแอลกอฮอล์ภายหลังการหมักนี้เรียกว่า เบียร์ (beer) หรือแมช (mash) หรือน้ำสำ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหอกลั่น

2.1.2 การกลั่นแอลกอฮอล์ (Distillation) น้ำสำถูกส่งมายังหอกลั่นแรก เพื่อกลั่นแยกแอลกอฮอล์ออกมา ได้แอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 50 ส่วนหนึ่งของที่กลั่นได้นี้ถูกนำไป



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงกรรมวิธีการผลิตสุราและจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสุรา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยากร

ขุทมาลางกรรมมหาวิทยาลัย

ผลิตเป็นสุราขาว และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปกลั่นในขั้นต่อไป เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตร

2.1.3 การผลิตสุราขาว (Raw Alcohol Production) ส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์ร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งแรก จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 28 โดยปริมาตร หรือ  $28^{\circ}$  (28 degree) เรียกว่า สุราขาว จากนั้นกรองเศษผงและสิ่งเจือปนออก บรรจุให้เหมาะสมและนำมาบ่มต่อประมาณ 7 วัน แล้วนำไปบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

2.1.4 การผลิตสุราผสม (Blended Liquor Production) นำแอลกอฮอล์-บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งที่สอง มาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร หรือ  $35^{\circ}$  (35 degree) แล้วเติมสี ยาสมุนไพร และส่วนประกอบอื่น ๆ เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติตามความต้องการ จากนั้นนำมากรองและบ่มต่อประมาณ 7 วัน ก่อนบรรจุลงขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

## 2.2 ประเภทน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

น้ำทิ้งจากโรงงานสุราแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.2.1 น้ำทิ้งประเภทเข้มข้น น้ำทิ้งส่วนนี้มีค่า BOD สูงประมาณ 2,500-35,000 กรัมต่อลบ.ม. ได้แก่ น้ำล้างถังหมัก และน้ำกากส่า ปริมาณน้ำทิ้งทั้งสองขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตของแต่ละโรงงาน เนื่องจากน้ำล้างถังหมักมีปริมาณน้อยประมาณ 5-10 ลบ.ม.ต่อวัน (3) ส่วนน้ำกากส่ามีประมาณ 300-450 ลบ.ม.ต่อวัน (4) น้ำทิ้งทั้งสองจึงนำมาบำบัดรวมกัน แม้ว่าค่า BOD จะแตกต่างกันประมาณ 14 เท่า (3)

2.2.2 น้ำทิ้งประเภทเจือจาง เป็นน้ำทิ้งที่มีค่า BOD ต่ำ ประมาณ 10-450 กรัมต่อลบ.ม. (4) ได้แก่ น้ำล้างขวด น้ำหล่อเย็น และน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือน เป็นต้น น้ำทิ้งประเภทนี้ไม่นำมาบำบัดรวมกับน้ำกากส่า เนื่องจากมีค่า BOD แตกต่างกันอย่างมีปริมาณสูง การแยกบำบัดจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า (3)

## 2.3 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

น้ำทิ้งของโรงงานสุราส่วนใหญ่มาจากกระบวนการผลิตสุราในแต่ละขั้นตอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 สำหรับคุณลักษณะของน้ำทิ้งประเภทต่าง ๆ จากโรงงานสุรา มีลักษณะแตกต่าง

ตารางที่ 2.1 คุณภาพของน้ำเสียประเภทต่าง ๆ ของโรงงานต้มกลั่นสุรา 32 แห่ง ที่วราชาอาณาจักร (4)

ประเภทน้ำเสีย	ค่า	ปริมาณน้ำทิ้ง ลบ.ม.ต่อวัน	pH	อุณหภูมิ °C	BOD <sub>5</sub> กรัมต่อ ลบ.ม.	COD กรัมต่อ ลบ.ม.	COD/ BOD	SS กรัมต่อ ลบ.ม.	TS กรัมต่อ ลบ.ม.	TVS กรัมต่อ ลบ.ม.	Settleable Solids กรัมต่อลบ.ม.	Total N กรัมต่อ ลบ.ม.	P กรัมต่อ ลบ.ม.	K กรัมต่อ ลบ.ม.	SO <sub>4</sub> กรัมต่อ ลบ.ม.	Alkalinity กรัมต่อลบ.ม.	Hardness กรัมต่อ ลบ.ม.
น้ำกากส่า (สำแดง) Stillage	เฉลี่ย	90	3.7	88.6**	27,475	118,100	4.3	11,319	75,830	58,520	27	940	115	4,760	3,720		
	พิสัย	23-400	2.3- 5.5	53-100	17,500- 45,000	56,970 193,600	1.90- 7.67	5,240 23,830	36,850- 123,640	30,280- 59,220	trace- 260	40- 2,160	24- 380	2,300- 8,900	1,820- 5,160		
น้ำล้างขวด Bottle washing Waste	เฉลี่ย	90	7.2	29.5	100	220	2.2	107.3	308.5	143.8	-	3.2	0.16				
	พิสัย	4.0-720	4.5- 12.2	24-38.5	10-450	36-96	-	7-658	96- 1,414	36-394	-	0.7-10.5	0.08- 0.25				
น้ำหล่อเย็นคอนเดนเซอร์ Cooling Water for Stillage	เฉลี่ย	812	6.8	42.8	27	54.2	2.0	72.4	277.8	96.4	-	347	7		77	57	
	พิสัย	16-4,560	4.3 8.5	29-59	11-42	8-159	1-4	0.5-819	34-982	22-718	-	0.33- 3,000	-			5.6-130	6.6-134

หมายเหตุ \* สํารวจโดย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (สวท.)

\*\* สำหรับโรงงานแห่งใหม่ อุณหภูมิจะลดลงเป็น 40 °C เพราะจะต้องผ่าน heat exchanger

กันไปด้วยแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

น้ำกากส่าเป็นน้ำทิ้งซึ่งออกจากหมักครั้งแรก (Mash Distilling Column) โดยทั่วไป น้ำกากส่าแบ่งได้ 2 ชนิด คือ กากส่าขาว ได้จากการใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบในการผลิต และ กากส่าแดง ซึ่งได้จากระบวนการผลิตที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ (2) น้ำกากส่าจากโรงงาน-สุราเกือบทุกแห่งในประเทศไทยเป็นชนิดกากส่าแดง มีสีน้ำตาลเข้มหรือดำ มีฤทธิ์เป็นกรด (3) และมีความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยปกติที่อัตราการผลิต 4,500 เทตอวัน (1 เท = 20 ลิตร) จะมีปริมาณน้ำกากส่าประมาณ 300 ลบ.ม.ต่อวัน หรือมีปริมาณน้ำกากส่าประมาณ 3.5 เท่า ของอัตราการผลิต (3,4)

#### 2.4 ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Biochemistry of Anaerobic Digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยการหมักแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) แบ่งขั้นตอนการย่อยสลายออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ (ดังรูปที่ 2.2)

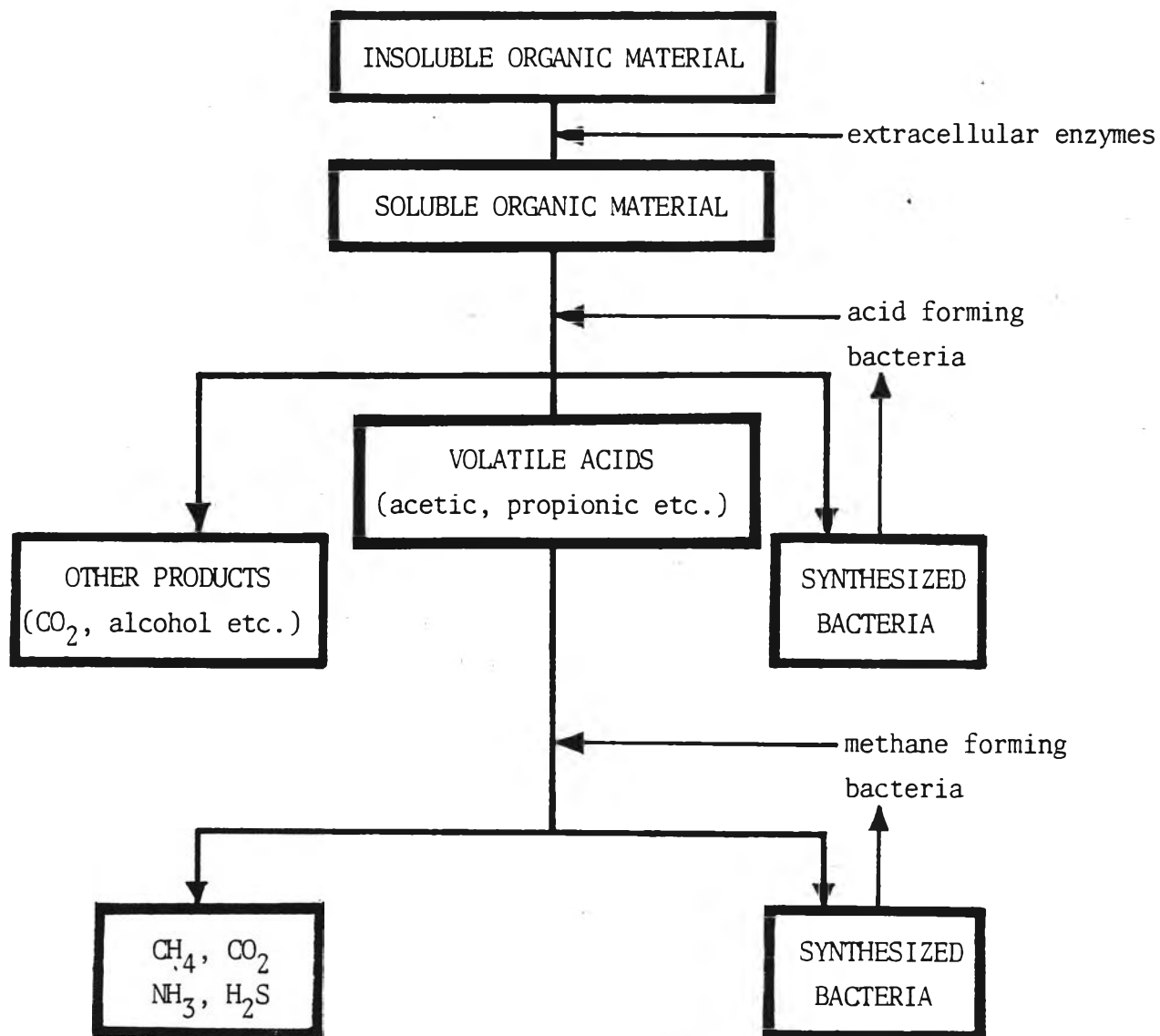
##### 2.4.1 Hydrolysis

##### 2.4.2 Acid Production

##### 2.4.3 Methane Production

2.4.1 Hydrolysis สารอินทรีย์พวกโปรตีน (protein) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) และไขมัน (fats) เป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ไม่สามารถซึมผ่านเยื่อผนังเซลล์ (cell membrane) ของจุลชีพได้ จึงต้องลดขนาดโมเลกุลให้เล็กลงโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจุลชีพจะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ (extracellular enzymes) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (5,6,7) ผลของการย่อยสลายในขั้นแรกนี้โปรตีนถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโน (amino acid) คาร์โบไฮเดรตถูกย่อยสลายเป็นกลูโคส (glucose) และไขมันถูกย่อยสลายเป็นกลีเซอรอล (glycerol) และกรดไขมัน (fatty acid) (6)

2.4.2 Acid Production ในขั้นนี้จุลชีพจะดูดซึมสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ ที่ได้จาก การย่อยสลายในขั้นแรกผ่านผนังเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์ ผลของการย่อยสลายจะได้กรดระเหย (volatile acids) และสารอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ (alcohol) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันมีการสร้างเซลล์ใหม่เกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 2.2 การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของของเสียอินทรีย์

(ANAEROBIC DIGESTION OF ORGANIC WASTES) (8)

จุลชีพที่ทำหน้าที่ในขั้นนี้เรียกว่า "Acid Forming Bacteria" หรือ "Non-methanogenic Bacteria" ซึ่งมี 2 ชนิดคือ พวกที่ดำรงชีพโดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน-อิสระ (obligate anaerobic bacteria) และพวกที่ดำรงชีพโดยอาศัยหรือไม่ต้องอาศัยออกซิเจนอิสระก็ได้ (facultative bacteria) จุลชีพที่สร้างกรดเหล่านี้เจริญเติบโตได้เร็วและปรับตัวได้ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม (5) ชนิดของจุลชีพกลุ่มนี้ที่พบในถังหมักแบบไร้ออกซิเจนได้มีการรายงานไว้ดังตารางที่ 2.2

Hindin และ Dunstan (9) พบว่ากรดระเหยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ ได้แก่ กรดอะเซติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และมีกรดบิวไทรค (butyric acid) เพียงส่วนน้อย

McCarty (7) ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากการย่อยสลายของจุลชีพแบบไร้ออกซิเจน ดังรูปที่ 2.3

2.4.3 Methane Production เป็นขั้นที่เกิดก๊าซมีเทน (methane) ขึ้น โดยจุลชีพกลุ่มที่เรียกว่า "Methane Forming Bacteria" หรือ "Methanogenic Bacteria" จะเปลี่ยนกรดระเหยไปเป็นก๊าซต่าง ๆ ที่สำคัญได้แก่ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จุลชีพกลุ่มนี้ดำรงชีพอยู่ได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระเท่านั้น (obligate anaerobic bacteria) และไว (sensitive) ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมมาก การเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มนี้ถูกยับยั้งได้แม้จะมีปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อยก็ตาม (12) ตัวอย่างชนิดของจุลชีพที่สร้างมีเทนได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.3

กรดระเหยที่สำคัญที่สุดซึ่งจุลชีพใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนคือ กรดอะเซติก (acetic acid) ได้มีการศึกษาใช้สารอาหารชนิดต่าง ๆ หลายชนิดพบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 70 ผลิตมาจากกรดอะเซติก และจุลชีพที่สร้างมีเทนบางพันธุ์ (species) สามารถผลิตก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ได้ (12,13) ดังสมการที่ 2.1

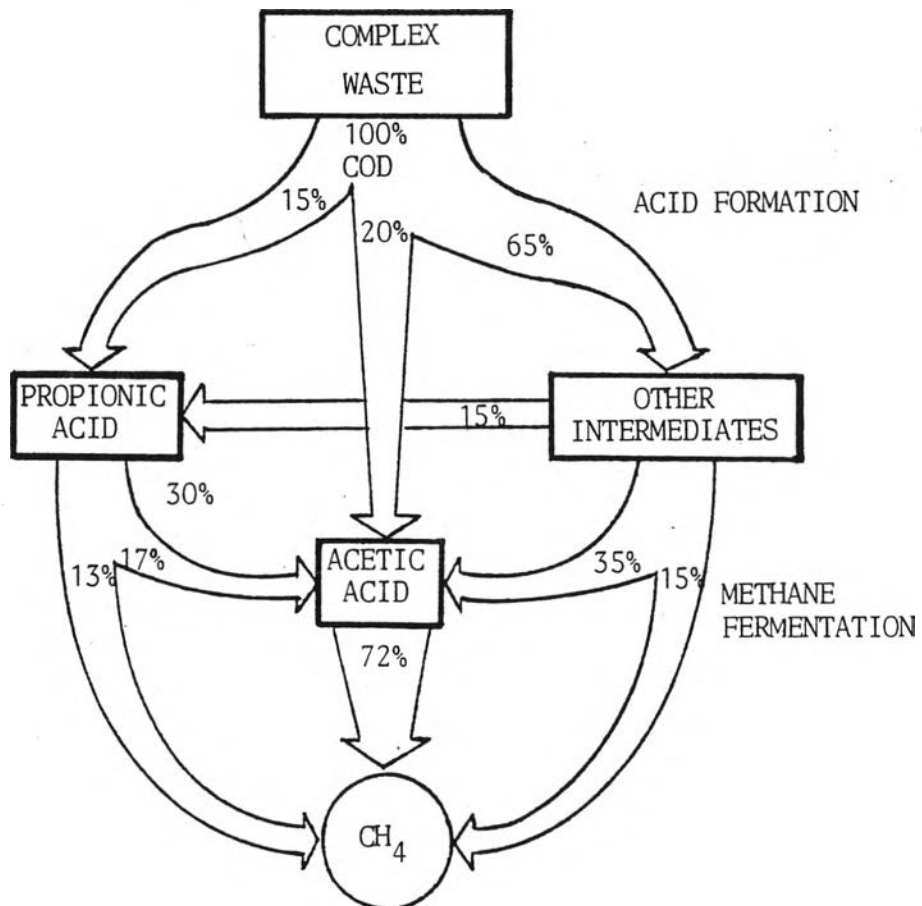


กลไก (mechanism) การเปลี่ยนแปลงกรดอะเซติกไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้มีการสมมติฐานไว้ 2 กลไก คือ

ตารางที่ 2.2 ชนิดของจุลินทรีย์ที่สร้างกรด (Non-methanogenic Bacteria) ที่พบในถังหมัก  
แบบไร้ออกซิเจน (10,11)

Genus	Bacterial species	Reference
Aerobacter	A. aerogenes	TOERIEN(1967a)
Aeromonas	Aeromonas sp.	KOTZE et al.(1968)
Alcaligenes	A. bookerii	TOERIEN(1967b)
	A. faccalis	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. pumilis	HATTINGH et al.(1967), TOERIEN(1967b)
	B. sphaericus	TOERIEN(1967b)
	B. subtilis	TOERIEN(1967a)
	Bacillus sp.	TOERIEN(1967a)
	Bacteroides	Bacteroides sp.
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)
	Nisseria	N. catarrhalls
Paracolonbacirum	P. intermedium	TOERIEN(1967b)
	P. coliforme	TOERIEN(1967b)
Proteus	P. vulgaris	TOERIEN(1967b)
Pseudomonas	P. acruginosa	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. pulusiris
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)





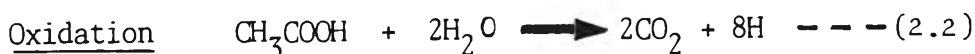
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (7)

ตารางที่ 2.3 ชนิดของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) ที่พบในดินหมัก  
แบบไร้ออกซิเจน (14)

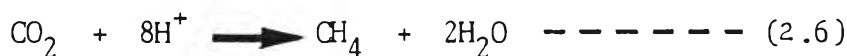
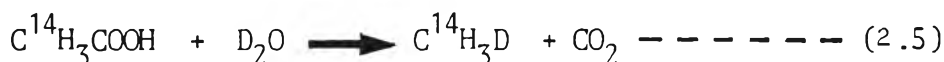
Bacterium	Substrates	Products
Methanobacterium formicum	CO H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> Formate	CH <sub>4</sub>
M. mobilis	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> Formate	CH <sub>4</sub>
M. propionicum	Propionate	CO <sub>2</sub> + acetate *
M. ruminantium	Formate H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
M. sohngeniei	Acetate butyrate	CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>
M. suboxydans	Caproate and butyrate	Propionate and acetate *
Methanococcus mazei	Acetate and butyrate	CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>
M. vanniellii	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> Formate	CH <sub>4</sub>
Methanosarcina barkeri	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> Methanol Acetate	CH <sub>4</sub> CH <sub>4</sub> CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>
M. methanica	Acetate Butyrate	CH <sub>4</sub>

\* Acetate or propionate converted to CH<sub>4</sub> in a two-step process.

ก) จากทฤษฎี Carbon Reduction ของ Van Niel (14) ได้อธิบายกลไกที่เกิดขึ้นว่า ในขั้นแรกกรดอะซิติกจะถูกออกซิไดซ์ (oxidized) ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นจะเกิดกระบวนการรีดักชัน (reduciton process) โดยคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนหรือทั้งหมดจะถูกรีดิวซ์ (reduce) ไปเป็นมีเทน ดังสมการข้างล่างนี้



ข) ในช่วง ปี ค.ศ. 1960-1970 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกิริยาโดยใช้คาร์บอน-14 ( $\text{C}^{14}$ ) และน้ำในรูป  $\text{D}_2\text{O}$  (deuterate water) พบว่า กลุ่มของเมทิลอาจเปลี่ยนไปเป็นมีเทนได้โดยตรงโดยไม่ต้องเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อน ดังสมการที่ 2.5



2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Factors Affecting Anaerobic Digestion)

ในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานและประสิทธิภาพของระบบแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factors) และปัจจัยทางด้านการปฏิบัติงาน (operational factors) (15) ดังตารางที่ 2.4

2.5.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Factors)

- พีเอช (pH)

McCarty (16) รายงานว่า ระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนทำงานได้ดีในช่วงพีเอช 6.6-7.6 สำหรับช่วงที่เหมาะสม (optimal range) อยู่ระหว่าง 7.0-7.2 ซึ่งเป็นช่วงแคบ ๆ เนื่องจากจุลชีพที่สร้างมีเทน (methanogenic bacteria) มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ค่าพีเอชที่ต่ำกว่า 6.6 ทำให้ระบบมีสภาพเป็นกรดซึ่งยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มนี้ได้ และสภาวะที่เป็นกรดพีเอช 6.2 จะเป็นพิษต่อจุลชีพกลุ่มนี้

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานและประสิทธิภาพของระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน

ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Factors)	ปัจจัยทางการปฏิบัติงาน (Operational Factors)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พีเอช (pH)</li> <li>2. ความเป็นด่าง (Alkalinity)</li> <li>3. ความเข้มข้นของกรดระเหย (Volatile Acids Concentration)</li> <li>4. อุณหภูมิ (Temperature)</li> <li>5. อาหารเสริม (Nutrient Availability)</li> <li>6. สารพิษ (Toxic Materials)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ระยะเวลาในการหมัก (Retention Time)</li> <li>2. ความเข้มข้นของสารอาหาร (Substrate Concentration)</li> <li>3. อัตราการรับสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)</li> <li>4. การเจือจาง (Dilution)</li> <li>5. การกวน (Mixing)</li> </ol>

Dague และคณะ (17) พบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 6.5 ความเข้มข้นของกรดระเหย 5,400 กรัมต่อลบ.ม. สามารถยับยั้งการผลิตก๊าซของจุลชีพที่สร้างมีเทนได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอช 7.0 ความเข้มข้นของกรดระเหยเท่าเดิมปรากฏว่าการผลิตก๊าซยังคงดำเนินต่อไป แม้ว่าความเข้มข้นของกรดระเหยจะเพิ่มสูงถึง 7,200 กรัมต่อลบ.ม. แต่ถ้าควบคุมพีเอชไว้ได้การผลิตก๊าซของจุลชีพกลุ่มนี้จะเกิดมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชมีความสำคัญต่อการควบคุมการทำงานของระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน

Kirsch และ Sykes (18) รายงานว่า โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เป็นสารเคมีที่ดีที่สุดในการควบคุมพีเอชของระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากสารเคมีตัวนี้สามารถละลายน้ำได้ดีและให้ความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต (bicarbonate) แก่ระบบโดยตรง

- ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนส่วนใหญ่อยู่ในรูปไบคาร์บอเนต (bicarbonate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และน้ำ ความเป็นด่างทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ให้แก่ระบบ ทำให้สามารถควบคุมพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้

Mc Carty (16) ได้เสนอว่า ค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (bicarbonate alkalinity) ควรรักษาให้อยู่ในช่วง 2,500–5,000 กรัมต่อลบ.ม. เพื่อให้มีความสามารถในการบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ได้เพียงพอ นอกจากนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมสำหรับระบบไร้ออกซิเจน ดังรูปที่ 2.4 McCarty ได้ชี้ให้เห็นว่าค่าความเป็นด่างคิดในรูป  $\text{CaCO}_3$  ในระบบไม่ควรต่ำกว่า 1,000 กรัมต่อลบ.ม. เพื่อป้องกันไม่ให้พีเอชลดต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อจุลชีพในระบบได้

Pohland (19) ได้เสนอสมการควบคุมความสมดุลกรด-ด่าง (Acid-Base Equilibrium Control) เพื่อใช้ควบคุมพีเอชของระบบดังนี้

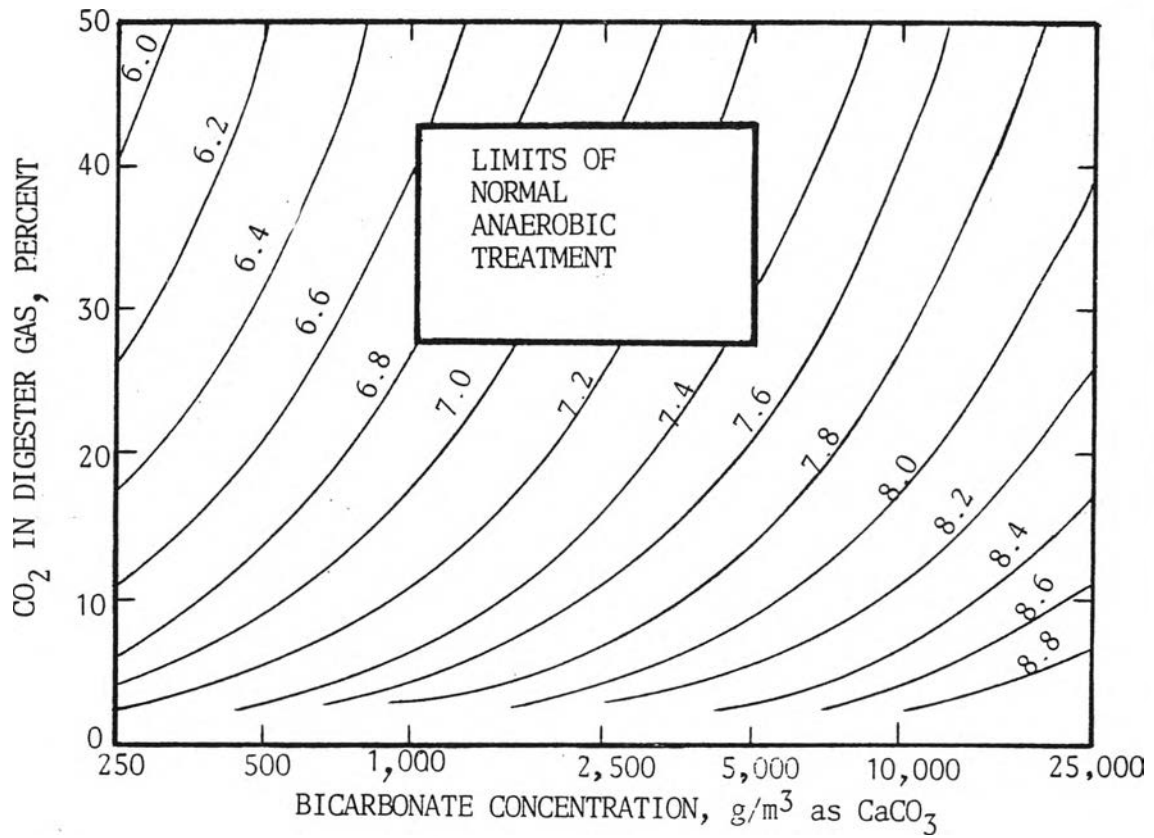
$$\text{BA} = \text{TA} - (0.833)(0.85) \text{TVA} \quad \text{--- (2.7)}$$

โดย BA = ปริมาณความเข้มข้นของด่างไบคาร์บอเนตที่มากเกินไปหรือที่ขาดไปในระบบ (กรัมต่อลบ.ม. ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$ )

TA = ปริมาณความเข้มข้นของด่างทั้งหมด (total alkalinity) ในระบบ (กรัมต่อลบ.ม. ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$ )

TVA = ปริมาณความเข้มข้นของกรดระเหยทั้งหมด (total volatile acid) ในระบบ (กรัมต่อลบ.ม. ในรูปของ  $\text{CH}_3\text{COOH}$ )

Graef และ Andrew (20) พบว่า การเพิ่มความเป็นด่างไบคาร์บอเนตให้แก่ระบบทำให้เสถียรภาพ (stability) ของระบบเพิ่มขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น ที่ SRT 15 วัน เมื่อเพิ่มค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจาก 3,000 กรัมต่อลบ.ม. เป็น 4,000 กรัมต่อลบ.ม. เสถียรภาพของระบบจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต  
ที่อุณหภูมิ 35 °C (16)

- ความเข้มข้นของกรดระเหย (Volatile Acids Concentration)

ในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน กรดระเหยมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยจุลชีพจะเปลี่ยนกรดระเหยให้เป็นก๊าซมีเทน ในทางตรงกันข้าม (adverse effect) ถ้าความเข้มข้นของกรดระเหยสูงจะเป็นพิษต่อจุลชีพที่สร้างมีเทน

Buswell (21) กล่าวว่า ในถังหมักแบบไร้ออกซิเจนความเข้มข้นของกรดระเหยคิดในรูป  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ต้องไม่เกิน 2,000–3,000 กรัมต่อลบ.ม. มิฉะนั้นจะเป็นผลทำให้ปริมาณก๊าซลดลง และอาจหยุดยั้งขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทนได้

Krocker (22) ได้กล่าวว่า ความเข้มข้นของกรดระเหยที่ไม่แตกตัว (unionized VA 30–60 กรัมต่อลบ.ม. จะเป็นพิษต่อระบบ แต่ที่พีเอชสูงขึ้นการแตกตัว (ionization) ของกรดระเหยจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยลดความเข้มข้นของกรดระเหยที่ไม่แตกตัว และลดความเป็นพิษ

Andrew (23) ได้รายงานว่ กรดระเหยในรูปที่ไม่แตกตัว (undissociated VA) มีฤทธิ์ยับยั้งต่อจุลชีพ เนื่องจากผนังเซลล์ของจุลชีพจะยอมให้โมเลกุลที่ไม่แตกตัวซึมผ่านได้ดีกว่าโมเลกุลที่แตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นพีเอช (pH) ต่ำกรดระเหยจะถูกจุลชีพใช้มากขึ้น เมื่อกรดระเหยซึมผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลชีพจะแตกตัวทันที ทำให้พีเอชลดลงซึ่งส่งผลให้เอนไซม์มีฤทธิ์เปลี่ยนไปในทางตรงกันข้าม สมมติฐานนี้อาจใช้อธิบายในกรณีที่กรดระเหยมีฤทธิ์ยับยั้งรุนแรงที่ค่าพีเอชต่ำได้ (ต่ำกว่าพีเอช 5.8)

- อุณหภูมิ (Temperature)

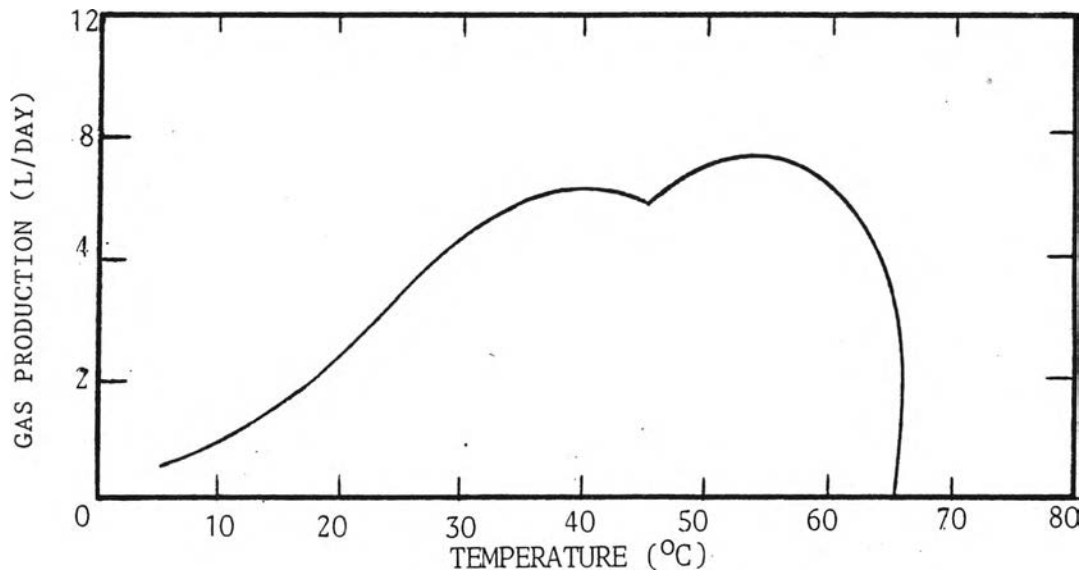
อุณหภูมิในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนมีความสำคัญ สามารถบ่งชี้ถึงอัตราการย่อยสลายและควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพได้ (5, 12) นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซของระบบ ดังรูปที่ 2.5 อุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถแบ่งได้ 2 ช่วงคือ

ก) Mesophilic Temperature อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 21–40 °C ช่วงที่เหมาะสมได้แก่ 30–38 °C (1) จุลชีพที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้เรียกว่า "Mesophilic Bacteria"

ข) Thermophilic Temperature อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 40–60 °C ช่วงที่เหมาะสมคือ 48–57 °C (1) และจุลชีพที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้เรียกว่า "Thermophilic Bacteria"

โดยปกติอุณหภูมิภายนอกและภายในถังหมักแบบไร้ออกซิเจนจะแตกต่างกัน 1-2 °C แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีไม่มาก (5)

Kotze และคณะ (24) กล่าวว่า การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิอย่างกะทันหัน แม้เพียง 2-3 °C สามารถทำให้การเกิดก๊าซมีเทนเปลี่ยนแปลงได้ จุลชีพที่สร้างมีเทน (methanogenic bacteria) มีความไวมากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน ดังนั้น เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ (stability) ที่ดี ควรควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงแคบ ๆ ของอุณหภูมิที่ปฏิบัติงาน (12) ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ยอมรับสำหรับระบบในช่วง mesophilic คือ  $\pm 2.8$  °C สำหรับสภาวะ thermophilic ที่อุณหภูมิ 49 °C คือ  $\pm 0.8$  °C และ  $\pm 0.3$  °C ที่อุณหภูมิ 52 °C (25)



รูปที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตก๊าซ (14)

#### - อาหารเสริม (Nutrient Availability)

อาหารเสริมมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพ โดยเฉพาะไนโตรเจน (nitrogen, N) และฟอสฟอรัส (phosphorus, P) ในระบบไร้ออกซิเจน (anaerobic system) ปริมาณเซลล์จุลชีพที่เกิดขึ้น (bacterial cell yield) มีน้อย ปริมาณอาหารเสริมที่ต้องการจึงไม่มากนัก (15)



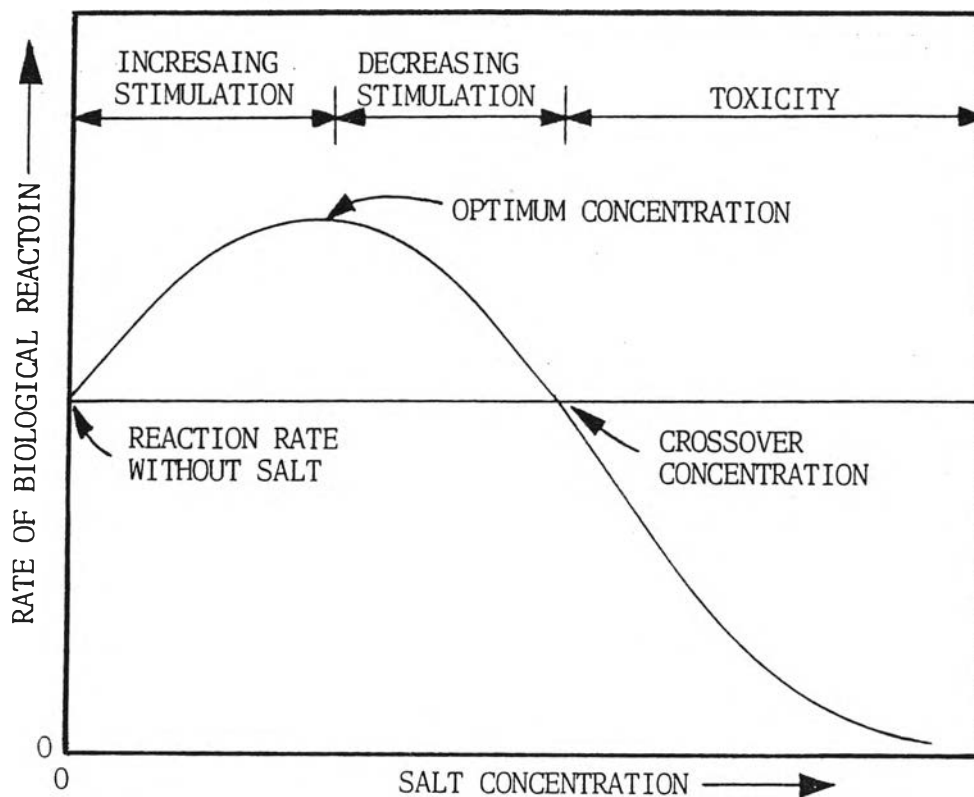
ปริมาณไนโตรเจนที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้น (cell yields) และส่วนของไนโตรเจน (nitrogen fraction) ในเซลล์ โดยคิดจากสูตรเคมีของเซลล์จุลชีพคือ  $C_5H_9O_3N$  จะได้ปริมาณไนโตรเจนที่ต้องการประมาณร้อยละ 11 ของน้ำหนักเซลล์ที่เป็นของแข็งระเหย (cell volatile solids weight) และต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 1 ใน 5 ของปริมาณไนโตรเจนที่ต้องการ หรือประมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักเซลล์ที่เป็นของแข็งระเหย (7,15) McCarty (7) รายงานว่าในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งแบบไร้ออกซิเจน ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลชีพต้องการอย่างน้อยต้องมีอัตราส่วน  $BOD_L : N : P$  เท่ากับ  $100 : 1.1 : 0.2$

#### - สารพิษ (Toxic Materials)

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำทิ้งอาจแสดงความเป็นพิษ (toxicity) หรือยับยั้ง (inhibit) ต่อระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ๆ (15,26) ระดับความรุนแรงมีตั้งแต่ยับยั้งการทำงานของจุลชีพจนถึงระดับ เป็นพิษโดยตรง อย่างไรก็ตามสารพิษบางชนิดอาจทำหน้าที่ช่วยกระตุ้น (stimulate) การทำงานของจุลชีพได้ เมื่อมีความเข้มข้นต่ำพอเหมาะ (26) ดังรูปที่ 2.6 สารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นพิษต่อระบบไร้ออกซิเจนอาจจำแนกได้ 4 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

ก) พิษของเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salt Toxicity) ได้แก่ เกลือของโลหะอัลคาไลน์ (alkali) และอัลคาไลน์เอิร์ท (alkali earth) เช่น Na, K, Ca และ Mg เกลือของธาตุเหล่านี้สามารถแตกตัวให้อิออนบวก (cations) และอิออนลบ (anions) ซึ่งอิออนบวกจะแสดงความเป็นพิษมากกว่าอิออนลบ อิออนเหล่านี้ออกฤทธิ์ได้หลายระดับขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นที่มีอยู่ ดังตารางที่ 2.5 ในระดับความเข้มข้นที่มีฤทธิ์ยับยั้งปานกลาง จุลชีพสามารถทนทานได้โดยการทำให้จุลชีพในระบบคุ้นเคย (acclimatize) กับสารเหล่านั้นเสียก่อน

โดยทั่วไปความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นตามค่าวาเลนซี (valency) และน้ำหนักอะตอม (atomic weight) ดังตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า  $Ca^{+2}$  และ  $Mg^{+2}$  มีความเป็นพิษมากกว่า  $Na^+$  และ  $K^+$  (23,24) พิษของอิออนบวกเหล่านี้มีผลต่อจุลชีพที่สร้างมีเทน (methane formers) มากกว่าจุลชีพที่สร้างกรด (acid formers) เนื่องจากจุลชีพที่สร้างมีเทนมีความไว (sensitivity) มากกว่าจุลชีพที่สร้างกรดนั่นเอง (14) ในกรณีที่มีอิออนบวกหลายชนิดอยู่ร่วมกันในระบบ อิออนบวกบางชนิดสามารถลดความเป็นพิษของอิออนบวกชนิดอื่น ๆ ได้ เรียก



รูปที่ 2.6 ผลของเกลือหรือสารอื่น ๆ ต่อปฏิกิริยาการทำงานในระบบ  
ไรรักษาใจเงิน (26)

ตารางที่ 2.5 ปริมาณของไอออนบวกของเกลืออนินทรีย์ที่มีอิทธิพลต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (26)

ไอออนบวก (Cation)	ปริมาณความเข้มข้น (กรัมต่อลบ.ม.)		
	มีฤทธิ์กระตุ้น	มีฤทธิ์ยับยั้งปานกลาง	มีฤทธิ์ยับยั้งอย่างรุนแรง
- โซเดียม (Sodium, Na <sup>+</sup> )	100-200	3,500-5,500	8,000
- โพแทสเซียม (Potassium, K <sup>+</sup> )	200-400	2,500-4,500	12,000
- แคลเซียม (Calcium, Ca <sup>+2</sup> )	100-200	2,500-4,500	8,000
- แมกนีเซียม (Magnesium, Mg <sup>+2</sup> )	75-150	1,000-1,500	3,000

ปรากฏการณ์ว่า "Antagonism" เช่น Na<sup>+</sup> 7,000 กรัมต่อลบ.ม. มีฤทธิ์ยับยั้งต่อระบบ แต่ ถ้ามี K<sup>+</sup> 300 กรัมต่อลบ.ม. อยู่ด้วย ฤทธิ์การยับยั้งจะลดลงร้อยละ 80 (26) ในทางตรงกันข้ามไอออนบวกบางชนิดจะเสริมความเป็นพิษของไอออนบวกชนิดอื่น ๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "Synergism" ปรากฏการณ์ทั้งสองของไอออนบวกได้รวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.6

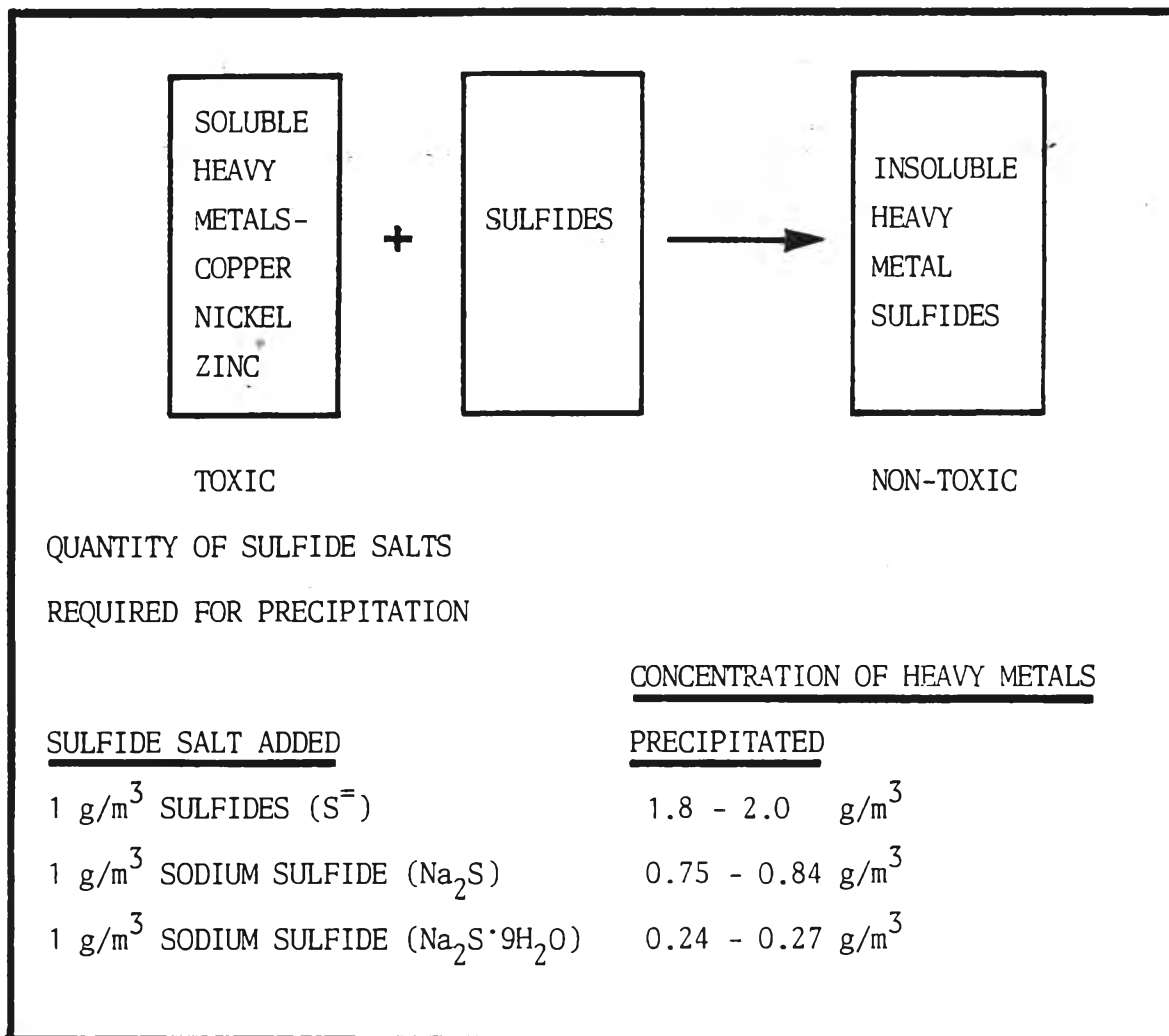
ข) พิษของโลหะหนัก (Heavy Metal Toxicity) เช่น Cu, Ni, Cr, Pb, Zn, Hg เป็นต้น ไอออนของโลหะหนักเหล่านี้แสดงความเป็นพิษเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย แต่ถ้าวางตัวกับซัลไฟด์ (sulfides) จะได้เกลือซัลไฟด์ของโลหะหนักซึ่งอยู่ในรูปของตะกอนที่ไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบ (14,26)

Lawrence และ McCarty (28) กล่าวว่า เมื่อเกลือซัลเฟตของทองแดง (CuSO<sub>4</sub>), สังกะสี (ZnSO<sub>4</sub>) นิกเกิล (NiSO<sub>4</sub>) และเหล็ก (FeSO<sub>4</sub>) ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ จะมีผลต่อการผลิตก๊าซเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>) จะถูกรีดิวส์ (reduce) ไปเป็นซัลไฟด์ (S<sup>=</sup>) ซึ่งสามารถรวมกับโลหะหนักกลายเป็นโลหะหนักซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำ

McCarty (26) รายงานว่า เกลือซัลไฟด์ในรูปแบบต่าง ๆ สามารถตกตะกอนโลหะหนักได้ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ปรัชการณ Antagonism และ Synergism ของอิออนบวกในกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (27)

Cation	Antagonist	Synergist	Concentration of Secondary Cation at which Antagonism Ends or Synergism Begins (g/m <sup>3</sup> )
Na	K		4,000-5,000
Na		NH <sub>4</sub>	200-400
Na		Ca	400-2,000
Na		Mg	250-1,250
NH <sub>4</sub>	Na		1,000-2,000
NH <sub>4</sub>		K	1,000
NH <sub>4</sub>		Ca	400-800
NH <sub>4</sub>		Mg	120-250
K	Na		2,000-2,500
K	Ca		2,000-4,000
K	Mg		1,700-2,000
K	NH <sub>4</sub>		1,700
Mg	Na		2,000-2,500
Mg	K		4,000-5,000
Mg		NH <sub>4</sub>	100-200
Mg		Ca	200
Ca	Na		1,000-1,200
Ca	K		4,000-5,000
Ca		NH <sub>4</sub>	700-900
Ca		Mg	100-250



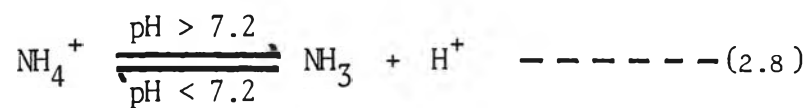
รูปที่ 2.7 การควบคุมความเป็นพิษของโลหะหนักโดยการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ (26)

Hayes และ Theis (29) ได้ศึกษาความเป็นพิษของโลหะหนักต่อระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่าวิธีการบ้อนเข้าสู่ระบบมีผลต่อระดับความเป็นพิษของโลหะหนักคือการบ้อนเข้าสู่ระบบแบบ "Pulse-Feeding" หรือ "Shock-Feeding" มีความเป็นพิษมากกว่าการบ้อนแบบ "Step-Feeding" ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขีดความเป็นพิษของโลหะหนักในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน (29)

Heavy Metal	Step-Fed		Pulse-Fed
	Inhibiting Concentration (g/m <sup>3</sup> )	Toxic Limit (g/m <sup>3</sup> )	Toxic Limit (g/m <sup>3</sup> )
Cr (III)	130	260	< 200
Cr (VI)	110	420	< 180
Cu	40	70	< 50
Ni	10	30	> 30
Cd	-	> 20	> 10
Pb	340	> 340	> 250
Zn	400	600	< 1700

ค) พิษของก๊าซบางชนิด ได้แก่ พิษของแอมโมเนีย และพิษของซัลไฟด์  
 พิษของแอมโมเนีย (Ammonia Toxicity) โดยทั่วไปแอมโมเนียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนเกิดจากการย่อยสลายสารพวกที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน ยูเรีย แอมโมเนียที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) หรือในรูปของก๊าซแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) และจะอยู่ในรูปไหนมากกว่ากันขึ้นอยู่กับพีเอช หรือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H<sup>+</sup>) ดังสมการสมดุล (equilibrium equation) ที่ 2.8 ที่พีเอช



ต่ำกว่า 7.2 สมดุลจะไปทางซ้าย แอมโมเนียจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) และที่พีเอชสูงกว่า 7.2 สมดุลจะกลับไปทางขวา แอมโมเนียส่วนใหญ่อยู่ในรูปก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ซึ่งเป็นพิษมากกว่าในรูปแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) (26)

McCarty (30) รายงานว่า ความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน 1,500–3,000 กรัมต่อลบ.ม. มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของจุลชีพที่พีเอชสูงกว่า 7.4 และถ้าความเข้มข้นมากกว่า 3,000 กรัมต่อลบ.ม. จะเป็นพิษต่อจุลชีพที่ทุก ๆ ค่าพีเอช

Hobson และ Shaw (31) ได้ศึกษาอิทธิพลของแอมโมเนียในโตรเจนกับจุลชีพ Methanobacterium formicicum พบว่าขีดจำกัดของแอมโมเนียในโตรเจนต่อจุลชีพเป็นไปตามที่ McCarty ได้รายงานไว้

พิษของซัลไฟด์ (Sulfide Toxicity) ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปที่ละลายอยู่ในน้ำ หรือไม่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับไอออนบวกที่รวมตัวอยู่ ซัลไฟด์ที่รวมตัวกับโลหะหนักจะไม่ละลายน้ำและตกตะกอนลงมาได้ จึงไม่เป็นอันตรายต่อจุลชีพ ส่วนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้จะอยู่ในรูปของกรดอนซึ่งสามารถแตกตัว (ionize) ได้

McCarty (26) พบว่าจุลชีพในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสามารถทนต่อซัลไฟด์ที่ละลายน้ำในปริมาณ 50–100 กรัมต่อลบ.ม. และสามารถทนได้ถึง 200 กรัมต่อลบ.ม. ถ้ามีการทำให้เคยชิน (acclimatize) เสียก่อน แต่ถ้าความเข้มข้นสูงมากกว่า 200 กรัมต่อลบ.ม. จะเป็นพิษต่อจุลชีพทันที

Eis และคณะ (32) ได้ศึกษาผลของสารประกอบกำมะถัน พบว่าผลกระทบส่วนใหญ่ของกำมะถันต่อการทำงานของระบบคือ ทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ซึ่งจะลดประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ ส่วนผลกระทบของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ทำให้พีเอชของระบบลดลง และเพิ่มความต้องการในการเติมพวกด่าง (base) ให้แก่ระบบ เพื่อรักษาพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพที่สร้างมีเทน

#### ง) พิษของสารอินทรีย์ (Organic Materials Toxicity)

สารอินทรีย์บางชนิดมีผลยับยั้งหรือเป็นพิษต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนได้ เช่น พวกแอลกอฮอล์

(alcohols), สารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic compound) กรดไขมันที่เป็นโซ่ยาว (long chain fatty acids) เป็นต้น (14)

McCarty (26) กล่าวว่า ความเข้มข้นของเมทานอล (methanol) 1,000–2,000 กรัมต่อลบ.ม. สามารถทำอันตรายต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนได้ แต่ถ้าทำให้ระบบคืนเคยจนจุลชีพในระบบสามารถปรับตัวได้และป้อนเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ระบบจะสามารถทำงานได้ปกติแม้ว่าความเข้มข้นจะสูงถึง 10,000 กรัมต่อลบ.ม. นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่เป็นพิษบางชนิดสามารถลดความเป็นพิษได้โดยการตกตะกอน เช่น โซเดียมโอเลต (sodium oleate) ความเข้มข้นมากกว่า 500 กรัมต่อลบ.ม. จะมีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของระบบ แต่เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) เพื่อให้ตกตะกอนในรูปเกลือแคลเซียม ระบบจะสามารถทำงานได้ปกติ แม้ความเข้มข้นจะสูงถึง 2,000–3,000 กรัมต่อลบ.ม.

Noack (23) ได้รายงานว่ ปริมาณฟีนอล (phenol) ร้อยละ 0.1–0.4 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) ในระบบ มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของระบบและจะเป็นพิษทันทีเมื่อมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.4 ของปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ

Johnson และ Young (33) กล่าวว่า ผลการยับยั้งของสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษ (toxic organic compound) มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารประกอบอินทรีย์นั้น ๆ เช่น คุณสมบัติการละลาย (solubility), การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) และคุณสมบัติการดูดซับ (adsorption property)

### 2.5.2 ปัจจัยทางการปฏิบัติงาน (Operational Factors)

#### - ระยะเวลาในการหมัก (Retention Time)

ระยะเวลาในการหมักมีอิทธิพลต่อการทำงานของระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน ค่าที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสารอาหารและสภาวะแวดล้อมภายในระบบ (5) ระยะเวลาในการหมักโดยทั่วไปแสดงอยู่ในรูป HRT (Hydraulic Retention Time)

HRT (Hydraulic Retention Time) หมายถึง ระยะเวลาโดยทฤษฎีที่ของเหลวอยู่ในระบบ มีค่าเท่ากับปริมาตรของถังหมักที่ใช้งาน (Effective Volume, V) หารด้วยปริมาณของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน (Q) ดังสมการที่ 2.9

$$\text{HRT} = \frac{V}{Q} \quad \text{--- (2.9)}$$



ส่วน SRT (Solid Retention Time) หมายถึง ระยะเวลาโดยทฤษฎีที่เซลล์ของจุลชีพอยู่ในระบบ มีค่าเท่ากับมวลของจุลชีพทั้งหมดภายในถังหมัก ( $M_R$ ) หารด้วยมวลของจุลชีพที่ออกจากถังหมักในแต่ละวัน ( $\phi_e$ ) ดังสมการที่ 2.10

$$SRT = \frac{M_R}{\phi_e} \quad \text{--- (2.10)}$$

ในกรณีที่ไม่มี การเวียนตะกอนกลับ (return sludge) ค่า HRT จะมีค่าเท่ากับ SRT

- ความเข้มข้นของสารอาหาร (Substrate Concentration)

สารอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ความเข้มข้นของสารอาหารจึงสามารถแสดงออกมาในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ของแข็งระเหย (Volatile Solid, VS), BOD หรือ COD ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยของแข็งเป็นส่วนใหญ่ เช่น ชยะ, มูลสัตว์ หรือเศษพืชผักต่าง ๆ ทางเกษตรกรรม นิยมแสดงในรูปแบบของแข็งระเหย ส่วนสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นของเหลว เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน นิยมแสดงในรูปแบบ BOD หรือ COD

- อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)

Organic Loading หมายถึง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวันโดยวัดออกมาในรูปแบบ VS, BOD หรือ COD ต่อปริมาตรของถังหมักที่ใช้งานต่อวัน ดังสมการข้างล่างนี้

$$\text{Organic Loading} = \frac{(\text{VS หรือ BOD หรือ COD}) \times Q}{V} \quad \text{--- (2.11)}$$

$$\text{หรือ} \quad \text{Organic Loading} = \frac{\text{VS หรือ BOD หรือ COD}}{\text{HRT}} \quad \text{--- (2.12)}$$

ค่า organic loading ที่สูงเกินไปจะทำให้ระบบเกิดสภาวะเปรี้ยว (sour condition) เนื่องจากในระบบมีความเข้มข้นของกรดระเหย (volatile acids) มากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง สำหรับค่า organic loading ที่

ต่ำเกินไปก๊าซที่เกิดขึ้นจะได้ปริมาณน้อย (5)

จากนิยามและสมการของ organic loading ที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่า ระยะเวลาในการหมัก ความเข้มข้นของสารอาหาร และอัตราการป้อนสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสามในถังหมักตะกอนชุมชน (municipal sludge digester) ดังนั้นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันสามารถกระทำได้ โดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือเปลี่ยนค่าระยะเวลาในการหมัก

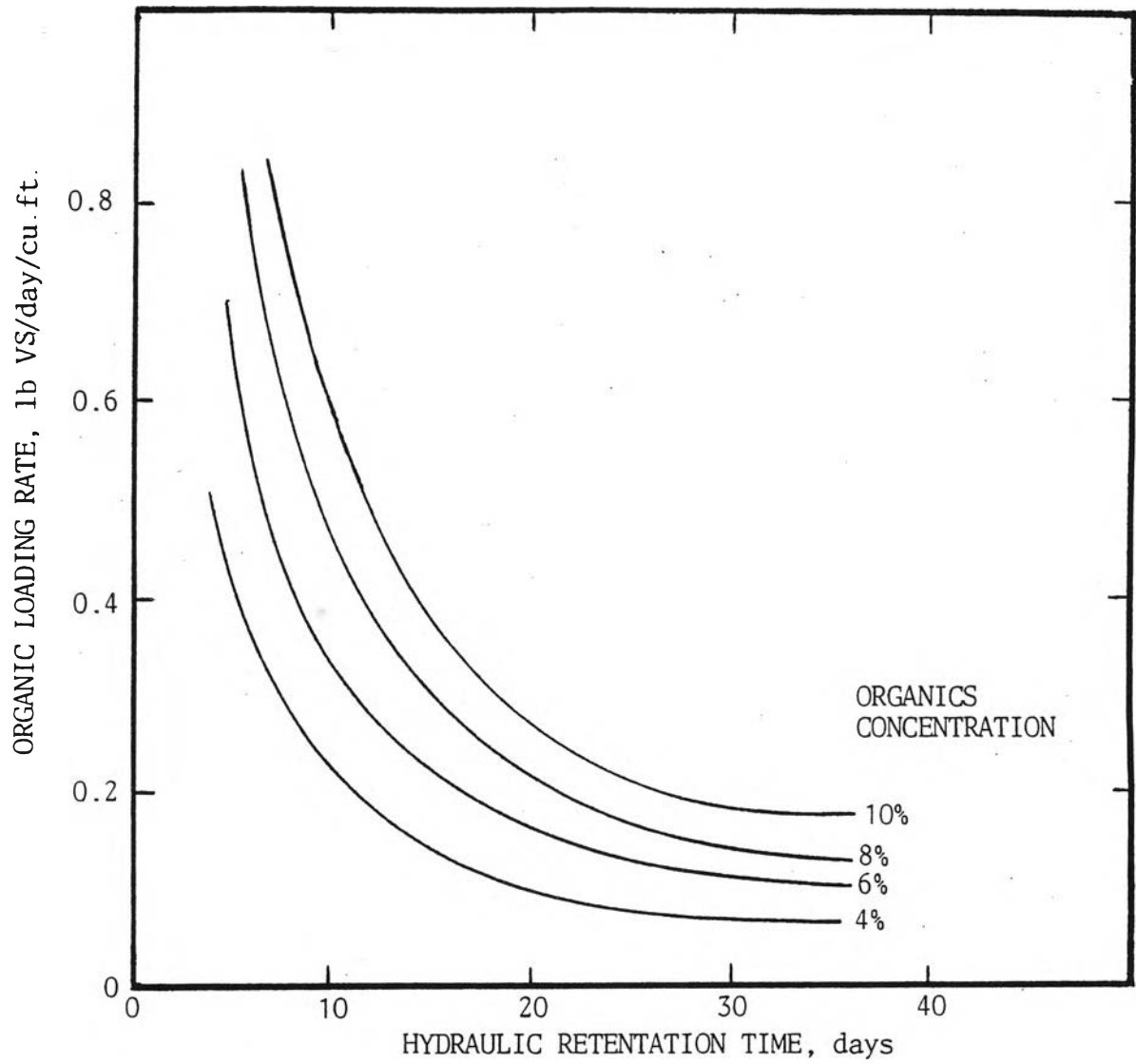
#### - การเจือจาง (Dilution)

สารอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบบางชนิดมีปริมาณของแข็งสูง เช่น มูลสัตว์ต่าง ๆ เป็นต้น เมื่อปริมาณของแข็งในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (gas yield) ลดลง เนื่องจากความหนืดของของเหลวในระบบทำให้จุลชีพไม่สามารถกระจายตัวได้ทั่วถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกสะสมอยู่ส่วนล่างของถังหมัก นอกจากนี้สารอาหารบางชนิดมีความเข้มข้นของเกลือแร่หรือสารพิษสูงเป็นอันตรายต่อระบบได้ การเจือจางสารอาหารเหล่านี้ก่อนป้อนเข้าสู่ระบบจะช่วยลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ อัตราส่วนของน้ำที่ใช้เจือจางสารอาหารขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ต้องการป้อนเข้าสู่ระบบ และ HRT (5)

#### - การกวน (Mixing)

การกวนภายในถังหมัก (digester) มีความสำคัญต่อระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) คือ

- ก) ช่วยกระจายสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอินทรีย์และจุลชีพมากขึ้น (5,34) อาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นด้วย
- ข) ช่วยกระจายความร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในถังหมักเท่ากันตลอด (34)
- ค) ป้องกันการตกตะกอนของสารอินทรีย์ (35) ทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเป็นไปอย่างทั่วถึง
- ง) ช่วยลดการเกิดขึ้นสิ่งสกปรกบนผิวน้ำ (scum layer) ทำให้สิ่งสกปรกบนผิวน้ำ (scum) แยกตัวออก (6,34) ก๊าซที่เกิดขึ้นสามารถออกจากระบบไปตามท่อนำก๊าซได้สะดวกขึ้น
- จ) ช่วยลดการสะสมของสารพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) (5,34)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการรับสารอินทรีย์, ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และ HRT ในถังหมัก (15)

จากรายงานของ WPCF (35) ของเหลวที่มีความเข้มข้นสูง บางครั้ง การทำให้สารที่ตกตะกอนสะสมกันอยู่ลอยตัวขึ้นมาทำได้ยาก การกวนอย่างต่อเนื่องจึงมีความสำคัญมาก Barnett et al. (36) ได้รายงานว่า การกวนวันละหนึ่งครั้งควรกวนเป็นเวลาหลาย ๆ นาที

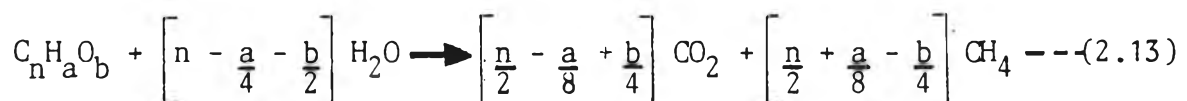
## 2.6 องค์ประกอบและปริมาณก๊าซที่ได้ (Gas Composition and Gas Yield)

ก๊าซที่ได้จากการหมักหรือการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์โดยจุลชีพในสภาพไร้ออกซิเจน เรียกว่า "ก๊าซชีวภาพ" (biogas) เป็นก๊าซที่ไม่ละลายน้ำและเบากว่าอากาศ (5) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพได้แก่ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และก๊าซอื่น ๆ ซึ่งมีอยู่เล็กน้อย เช่น แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (14) คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่ถูกกำหนดโดยก๊าซมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ และประสิทธิภาพของกระบวนการหมัก โดยทั่วไปประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 60-70

ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ (pure methane) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon compound) ในแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (carbon) 1 อะตอม (atom) และธาตุไฮโดรเจน (hydrogen) 4 อะตอม เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส เบากว่าอากาศ สามารถจุดติดไฟได้โดยให้เปลวไฟสีน้ำเงิน (5,37) คุณสมบัติที่สำคัญทางกายภาพและเคมีได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถทำนายตามทฤษฎีได้ 2 วิธี ดังนี้

ก) ทำนายจากองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย (Prediction From Waste Chemical Composition) โดยอาศัยสมการของ Buswell และ Mueller (21) ที่แสดงไว้ดังนี้



ข) ทำนายจากการย่อยสลายของของเสีย (Prediction From Waste Stabilization) McCarty (7) กล่าวว่า ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีมีความสัมพันธ์กับของเสียที่ถูกย่อยสลายดังนี้

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซมีเทน (Physical and Chemical Properties of Methane) (5,32)

Chemical formula	CH <sub>4</sub>
Molecular weight	16.042
Boiling point at 1 atm	-258.9°F (-161.61°C)
Freezing point at 1 atm	-296.5°F (-182.5°C)
Specific volume at 60°F (15.5°C), 1 atm	23.61 ft <sup>3</sup> /lb
Specific gravity, Gas 60°F (15.5°C), 1 atm	0.5549
Density, Gas at 32°F (0°C), 1 atm	0.04475 lb/ft <sup>3</sup>
Viscosity at 60°F (15.5°C)	0.012 centipoise
Viscosity, Gas at 32°F (0°C), 1 atm	0.0109 centipoise
Critical temperature	-115.8°F (-82.1°C)
Critical pressure	673.3 psia (45.8 atm)
Critical density	0.162 g/cc
Latent heat of vaporization at bp	121.87 cal/g
Latent heat of fusion at mp	14.03 cal/g
Specific heat, Gas at 60°F (15.5°C)	
C <sub>p</sub>	0.5271 Btu/lb (°F)
C <sub>v</sub>	0.4032 Btu/lb (°F)
Ratio C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub>	1.307
Air required for combustion ft <sup>3</sup> /ft <sup>3</sup>	9.53
Flammable limits in air	5.3-14% by volume
Octane rating	130
Heat of combustion at 25°C	97.8 Btu/ft <sup>3</sup>
Calorific value at 60°F (15.5°C), 1 atm	1,011.6 Btu/ft <sup>3</sup>
Ignition temperature	1,202°F (650°C)
Combustion equation	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O
O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> for complete combustion	3.98 by weight
O <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> for complete combustion	2.0 by volume
CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> from complete combustion	2.74 by weight
CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> from complete combustion	1.00 by volume

1 ปอนด์ BOD หรือ COD ที่ถูกย่อยสลาย = ก๊าซมีเทน 5.62 ลบ.ฟุต ที่ความดันบรรยากาศ หรือกล่าวได้ว่า 1 กิโลกรัม BOD หรือ COD ที่ถูกย่อยสลาย จะได้ก๊าซมีเทน 0.35 ลบ.ม. ที่ความดันบรรยากาศ

## 2.7 วิธีการทำงานของระบบ (Mode of Operations)

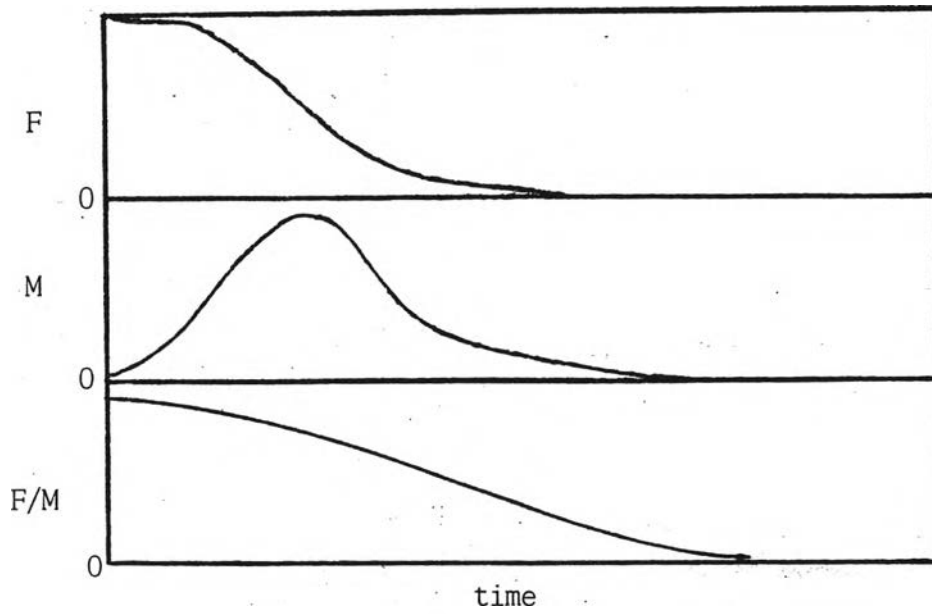
การหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังปฏิกรณ์ (reactor) หรือถังหมัก (digester) แบ่งการทำงานออกตามระบบการป้อนสารอินทรีย์ได้ 3 แบบคือ

2.7.1 ทำงานแบบครั้งคราว (Batch Operation) วิธีนี้ป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักเพียงครั้งเดียวจนเต็ม (1) สารอินทรีย์ในถังหมักถูกจุลชีพย่อยสลายอย่างช้า ๆ จนหมด ซึ่งสังเกตได้ว่าสารอินทรีย์หมดแล้วจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นน้อยลงทุกขณะ จนในที่สุดไม่เกิดอีกต่อไปจึงระบายสารอินทรีย์ที่ผ่านการหมักแล้วออกจากถังหมัก จากนั้นจึงป้อนสารอินทรีย์ใหม่ให้เต็มถังหมักอีกครั้ง วิธีนี้เหมาะสำหรับสารอินทรีย์ที่นาน ๆ มีสักครั้ง และมีปริมาณมาก เช่น พวกเศษขี้มูลพืชที่เหลือภายหลังการเก็บเกี่ยว เป็นต้น

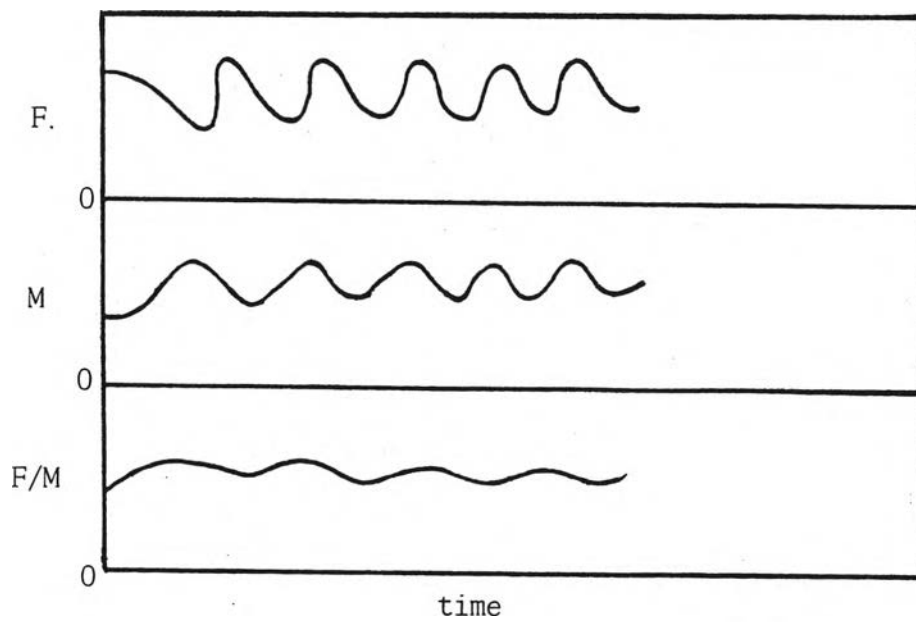
วิธีหมักแบบนี้ประสิทธิภาพไม่คืบคาน เสถียรภาพของระบบไม่คงที่ และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างอาหารและปริมาณจุลชีพ (F/M) ไม่คงที่ ดังรูปที่ 2.9 ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักจะมีปริมาณอาหาร (F) ที่ค่าสูงสุด และปริมาณจุลชีพ (M) ค่าต่ำสุด ดังนั้นค่า F/M มีค่ามาก เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณจุลชีพจะเพิ่มขึ้นในรูปทวีคูณ (exponential) แต่ปริมาณอาหารจะลดลงตามปริมาณจุลชีพที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า F/M ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณอาหารมีไม่เพียงพอ จุลชีพจะเริ่มตายไป ทำให้ปริมาณจุลชีพลดลงจนในที่สุดสิ่งมีชีวิตในระบบจะตายหมดเพราะขาดอาหาร

2.7.2 ทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Operation) วิธีนี้จะป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบทุกวัน โดยปกติวันละครั้ง เหมาะสำหรับสารอินทรีย์ที่มีเป็นประจำทุกวัน เช่น มูลสัตว์ต่าง ๆ เป็นต้น

ประสิทธิภาพของการหมักแบบนี้ดีกว่าแบบครั้งคราว เนื่องจากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบทุกวัน ทำให้อัตราส่วนระหว่างอาหารและปริมาณจุลชีพ (F/M) แปรเปลี่ยนในช่วงสั้น ๆ ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักทำให้ปริมาณอาหาร (F) มีค่าสูงสุดในขณะที่ปริมาณจุลชีพ (M) มีค่าต่ำสุด ค่า F/M มีค่ามาก เวลาผ่านไป



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $F$ ,  $M$ ,  $F/M$  กับเวลาของระบบแบบครั้งคราว  
(Batch Process)

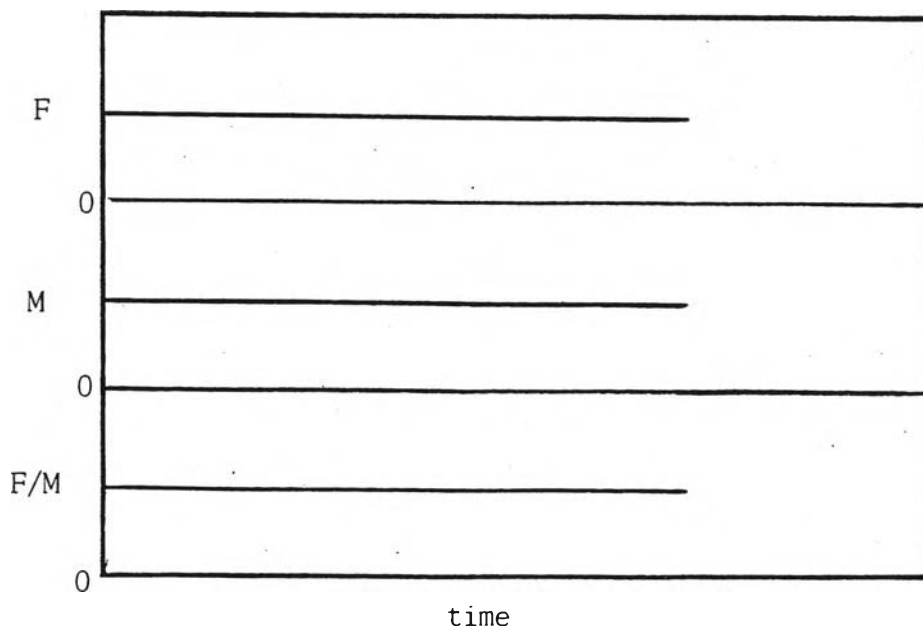


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $F$ ,  $M$ ,  $F/M$  กับเวลาของระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง  
(Semi-Continuous Process)

ปริมาณสารอาหารถูกจุลชีพย่อยสลายไปเป็นพลังงานและสร้างเซลล์ใหม่ ทำให้ค่า  $F$  ลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ค่า  $M$  เพิ่มขึ้น เมื่อค่า  $F$  ลดลงถึงจุดหนึ่งซึ่งทำให้ระบบมีปริมาณอาหารไม่พอจุลชีพบางส่วนจะตายลงทำให้ค่า  $M$  ลดลง และเมื่อมีการบ้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอีก ทำให้ค่า  $F$  เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของจุลชีพจะดำเนินไปคล้ายตอนเริ่มต้น ลักษณะดังกล่าวทำให้ค่า  $F$  และ  $M$  มีค่าขึ้น ๆ ลง ๆ ค่า  $F$  จะมีค่าสูงสุดทุกครั้งที่มีบ้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ

2.7.3 ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Operation) วิธีนี้จะบ้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบตลอดเวลา ในขณะที่เดียวกันสารอินทรีย์ที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกระบายออกจากระบบตลอดเวลาด้วย ซึ่งเหมาะสำหรับสารอินทรีย์ที่มีปริมาณมากและมีตลอดเวลา เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนิยมใช้วิธีแบบต่อเนื่องมากที่สุด (1)

การหมักแบบนี้ประสิทธิภาพของระบบสูงที่สุด เพราะมีการบ้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบตลอดเวลา การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอาหาร ( $F$ ) และปริมาณจุลชีพ ( $M$ ) เกิดในช่วงสั้นมาก ซึ่งอาจถือได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย ค่า  $F/M$  จึงมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ระบบแบบต่อเนื่องจะมีก๊าซเกิดขึ้นตลอดเวลาและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $F$ ,  $M$ ,  $F/M$  กับเวลา ของระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous Process)



## 2.8 การศึกษาที่ผ่านมา

Sen และ Bhaskaran (39) รายงานว่า การหมักน้ำกากส่าแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) สามารถลด BOD ได้ร้อยละ 80-85 ที่อัตราการรับสารอินทรีย์ (organic loading) 2.6 กก. BOD ต่อลบ.ม.ต่อวัน อุณหภูมิ 37 °C โดยใช้ HRT 10 วัน และถ้าอัตราการรับสารอินทรีย์สูงขึ้น ประสิทธิภาพและการทำงานของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

Radhakrishnan และคณะ (40) ได้ทำการทดลองหมักน้ำกากส่าที่อุณหภูมิ 37 °C ใช้ถังหมักขนาด 10 ลิตร พบว่าที่อัตราการรับสารอินทรีย์ 3 กก. BOD ต่อลบ.ม.ต่อวัน ประสิทธิภาพการบำบัด BOD ร้อยละ 81-85 โดยใช้ HRT 10 วัน และได้ก๊าซมีเทนร้อยละ 50-55 ของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด

Basu และ Leclerc (41) ได้ทดลองบำบัดน้ำกากส่าที่ได้จากกากน้ำตาลของหัวผักกาดหวานโดยระบบดังกล่าว พบว่าอัตราการรับสารอินทรีย์ 3.2 กก. BOD ต่อลบ.ม.ต่อวัน ที่ HRT 10 วัน ประสิทธิภาพการบำบัด BOD สูงถึงร้อยละ 95.5 แต่เมื่อเพิ่มอัตราการรับสารอินทรีย์เป็น 3.5 กก. BOD ต่อลบ.ม.ต่อวัน ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือร้อยละ 73.7 นอกจากนี้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบจะดียิ่งขึ้น ถ้ามีการเวียนตะกอนจุลินทรีย์กลับเข้าไปในถังอีก

Ramos (42) ได้อ้างถึงผลการทดลองของ Hiatt และคณะ ซึ่งได้ทดลองบำบัดน้ำกากส่าโดยเจือจางด้วยน้ำสะอาดในอัตราส่วน 2:1 อุณหภูมิ 35 °C ใช้ HRT 8.4 วัน พบว่า อัตราการรับสารอินทรีย์ 7.7 กก. COD ต่อลบ.ม.ต่อวัน สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 71 สำหรับน้ำกากส่าที่ไม่ได้เจือจางด้วยน้ำ ต้องใช้ HRT 16 วัน ที่อัตราการรับสารอินทรีย์ 5.9 กก. COD ต่อลบ.ม.ต่อวัน จึงสามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 70

Ratasuk (43) ทำการทดลองบำบัดน้ำกากส่าโดยใช้ระบบ Two Stage Mesophilic Digestion ตามด้วยระบบ Activated Sludge ใช้เวลาหมัก 5.75 วัน ที่อุณหภูมิ 30 °C อัตราการรับสารอินทรีย์ 1.97 กก. BOD ต่อลบ.ม.ต่อวัน สามารถลดค่า COD และ BOD<sub>5</sub> ได้ร้อยละ 64 และ 93 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดด้วยระบบ Activated Sludge ค่า F/M = 0.0284 สามารถลดค่า COD และ BOD<sub>5</sub> ได้ร้อยละ 31 และ 69.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษา ในห้องปฏิบัติการโดยใช้ระบบ Single Stage Batch

Mesophilic Digestion ที่อุณหภูมิ 30 °C ในเวลา 5 วัน ลดค่า COD และ BOD<sub>5</sub> ได้ร้อยละ 40 และ 43.5 ตามลำดับ ได้ก๊าซมีเทนร้อยละ 55.6 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 54 °C จะได้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 62.3

Qureshi (44) ได้ทดลองหมักน้ำกากส่าโดยระบบ Semi-batch Anaerobic Digestion ที่อุณหภูมิ 35 °C พบว่าอัตราการรับสารอินทรีย์ 8.3 กก. COD ต่อลบ.ม.ต่อวัน ใช้ HRT 11 วัน สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 77.9 และที่อุณหภูมิ 55 °C อัตราการรับสารอินทรีย์เท่าเดิม สามารถลดค่า COD ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 86.5

ASRCT\* (45) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำกากส่าโดยระบบ Anaerobic Activated Sludge และรายงานที่อุณหภูมิ 37 °C อัตราการรับสารอินทรีย์ 6.5 กก. COD ต่อลบ.ม.ต่อวัน HRT 10 วัน ประสิทธิภาพในการลดค่า COD มีค่าสูงสุกร้อยละ 60 และได้ก๊าซมีเทนร้อยละ 46

Kositratana (46) ได้ทดลองหมักน้ำกากส่าโดยระบบ Semi-batch Anaerobic Digestion ที่อุณหภูมิ 35 °C พบว่าอัตราการรับสารอินทรีย์ 9.0 กก. COD ต่อลบ.ม.ต่อวัน HRT ใช้เวลาหมัก 12 วัน สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 66.9 และได้ก๊าซมีเทนร้อยละ 48

ตารางที่ 2.9 ผลงานวิจัยการหมักน้ำกากส่าที่นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาผ่านมา

ผู้วิจัย	ลักษณะการหมัก	อุณหภูมิ °C	อัตราการรับสารอินทรีย์ (Organic Loading)		ระยะเวลาการหมัก (HRT) วัน	ประสิทธิภาพการบำบัด		% ก๊าซมีเทน (% CH <sub>4</sub> )
			กก. BOD/ม <sup>3</sup> วัน	กก. COD/ม <sup>3</sup> วัน		% BOD	% COD	
1. Sen and Bhaskaran (39)	AD	37	2.66	-	10	80-85	-	-
2. Radhakrishnan et. al (40)	AD	37	3.0	-	10	81-85	-	50-55
3. Basu and Leclerc (41)	AD	-	3.2	-	10	95.5	-	-
		-	3.5	-	10	73.7	-	-
4. Hiatt et. al (42)	AD	35	-	7.7	8.4	-	71	-
5. Rattasuk (43)	TSMD	30	1.97	-	5.75	93	64	-
6. Qureshi (44)	Semi-batch AD.	35	-	8.3	11	-	77.9	-
		55	-	8.3	11	-	86.5	-
7. ASRCT* (45)	AAS	37	-	6.5	10	-	60	46
8. Kositratana (46)	Semi-batch AD.	35	2.66	9.0	12	-	66.9	48

\*หมายเหตุ AD = Anaerobic Digestion  
 TSMD = Two Stage Mesophillic Digestion  
 AAS = Anaerobic Activated Sludge  
 ASRCT\* = Applied Science Research Co-operation of Thailand