



บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวความคิด

3.1 จุลชีวะและชีวเคมีของระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาชีวเคมีที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ในรูปตะกอน และรูปสารละลายให้เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นอีกเล็กน้อย กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีลักษณะการย่อยสลายที่เป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนแต่สามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนใหญ่ได้ 2 ขั้นตอน ดังรูปที่

3.1 คือ

3.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด (Acid Formation หรือ Non Methanogenic phase)

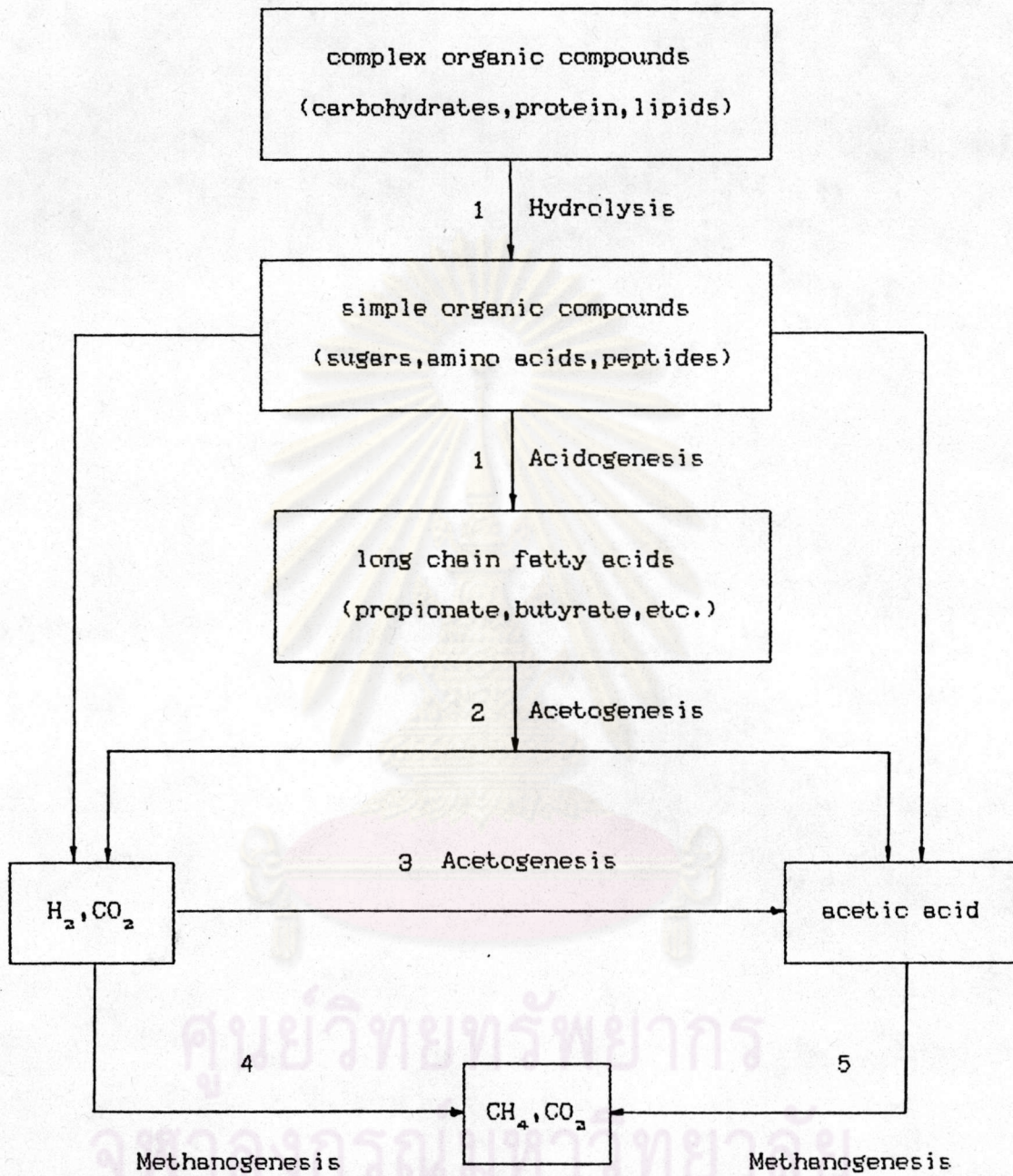
3.1.2 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane Formation หรือ Methanogenic phase)

3.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรด (Acid Formation หรือ Non Methanogenic Phase)

คือ ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดประกอบด้วยแบคทีเรียหลัก 2 ประเภท

ก) acid forming bacteria

ข) acetogenic bacteria



- 1) Fermentation bacteria
- 2) H_2 -producing acetogenic bacteria
- 3) H_2 -consuming acetogenic or homoacetogenic bacteria
- 4) CO_2 -reducing methanogenic bacteria
- 5) Acetoclastic methanogenic bacteria

รูปที่ 3.1 ลักษณะขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (3)

แบคทีเรียเหล่านี้จะมีทั้งพวกที่สามารถดำรงชีพอยู่ได้ในสภาวะที่มีและไม่มี ออกซิเจน (facultative anaerobic bacteria) และพวกที่ดำรงชีพอยู่ได้ในสภาวะที่ไม่มี ออกซิเจนอิสระเลย (obligate anaerobic bacteria) ในถึงหมักทั่วไปจะพบแบคทีเรียชนิด Obligate มากกว่าพวก Facultative anaerobic bacteria (4) ชนิดต่าง ๆ ของ Non Methanogenic bacteria ที่เป็นเชื้อบริสุทธิ์ (pure culture) ที่ค้นพบจนถึงปี 1969 แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 (5)

การย่อยสลายที่ทำให้เกิดกรดนี้อาจแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยได้ 2 ขั้นตอน คือ

ก) การย่อยสลายภายนอกเซลล์โดยวิธีไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

สารอินทรีย์พวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งมีขนาดโมเลกุล ใหญ่จะถูกลดขนาดลงเป็นกรดอะมิโน กลูโคส และกลีเซอรอล ตามลำดับ เพื่อให้ง่ายต่อการนำ ผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าไปในเซลล์ ปฏิกริยาที่ใช้ลดขนาดสารอินทรีย์เพื่อให้สามารถนำเข้าไปใน เซลล์ได้มักเป็นปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ (extracellular enzyme) ตามชนิดของสารอินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา การย่อยสลายตะกอนอินทรีย์ภายนอก เซลล์ด้วยปฏิกริยาไฮโดรไลซิส เพื่อให้ได้โมเลกุลขนาดเล็กอาจเป็นปฏิกริยากำหนดความเร็ว ของปฏิกริยารวมในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (6)

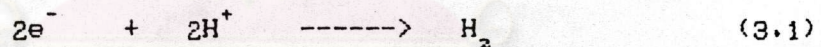
ข) การย่อยสลายภายในเซลล์

โมเลกุลขนาดเล็กที่ได้จากปฏิกริยาไฮโดรไลซิส จะถูกแบคทีเรียดูดซึม เข้าภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานโดยผ่านกระบวนการเฟอร์เมนเตชัน (fermentation) ผลปฏิกริยาของเฟอร์เมนเตชันจะมีทั้งผลที่อยู่ในรูปออกซิไดส์และรูปรีดิวส์ ส่วนที่เป็นรูปออกซิไดส์ส่วนใหญ่จะเป็นกรดโวลาทิล (volatile acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่ เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (acetic acid), กรดโพรไพโอนิก (propionic acid), กรดบิวไทริก (butyric acid), กรดแวลเลริก (valeric acid) และ กรดคาโปรอิก (caproic acid) ปฏิกริยาที่ใช้สร้างกรดเหล่านี้เรียกว่า เอซิโดเจเนซิส (acidogenesis) และแบคทีเรียที่รับผิดชอบเรียกว่าแบคทีเรียสร้างกรด (acid forming bacteria) ส่วนผล ปฏิกริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและภาวะแวดล้อมของถังปฏิกริยา ยกตัวอย่าง เช่น แบคทีเรียที่สร้างกรดบางชนิดสามารถใช้ไฮโดรเจนไอออนเป็นสารรับอิเล็กตรอน (แทน สารอินทรีย์) ทำให้เกิดไฮโดรเจน (โมเลกุล) ขึ้นมา ในกรณีเช่นนี้ผลปฏิกริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ จะไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อย แต่ถ้าไม่สร้างไฮโดรเจน มันต้องใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวรับ

ตารางที่ 3.1 non methanogenic bacteria ที่พบในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (5)

Genus	Bacterial species	Reference
<i>Aerobacter</i>	<i>A. aerogenes</i>	TOERIEI (1967a)
<i>Aeromonas</i>	<i>Aeromonas</i> sp.	KOTZÉ <i>et al.</i> (1968)
<i>Alcaligenes</i>	<i>A. bookerii</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>A. faecalis</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962), TOERIEI (1967b)
	<i>A. viscolactis</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962)
	<i>Alcaligenes</i> sp.	KITZÉ <i>et al.</i> (1968)
<i>Bacillus</i>	<i>B. cereus</i>	HATTINGH <i>et al.</i> (1967), TOERIEI (1967a,b)
	<i>B. cereus</i> var. <i>mycolides</i>	HATTINGH <i>et al.</i> (1967), TOERIEI (1967a,b)
	<i>B. circulans</i>	TOERIEI (1967a,b)
	<i>B. endorhynchus</i>	BUCK <i>et al.</i> (1954)
	<i>B. firmus</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>B. knefelkampii</i>	COOKSON and BURBANK (1965), BURBANK <i>et al.</i> (1966)
	<i>B. megaterium</i>	HATTINGH <i>et al.</i> (1967), TOERIEI (1967a, b)
	<i>B. pantothenicus</i>	HATTINGH <i>et al.</i> (1967)
	<i>B. pumilus</i>	HATTINGH <i>et al.</i> (1967), TOERIEI (1967b)
	<i>B. sphaericus</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>B. subtilis</i>	TOERIEI (1967a)
	<i>Bacillus</i> sp.	TOERIEI (1967a)
<i>Bacteroides</i>	<i>Bacteroides</i> sp.	POST <i>et al.</i> (1967)
<i>Clostridium</i>	<i>C. aminovalericum</i>	HARDMAN and STADTMAN (1960)
	<i>C. carnosotoides</i>	COOKSON and BURBANK (1965), BURBANK <i>et al.</i> (1966)
	<i>C. carnosotoides</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962), COOKSON and BURBANK (1965)
<i>Escherichia</i>	<i>E. coli</i>	BURBANK <i>et al.</i> (1966), TOERIEI (1967b)
	<i>E. intermedia</i>	TOERIEI (1967a)
	<i>Escherichia</i> sp.	KOTZÉ <i>et al.</i> (1968)
<i>Klebsiella</i>	<i>Klebsiella</i> sp.	BURBANK <i>et al.</i> (1966)
<i>Leptospira</i>	<i>L. biflexa</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>Leptospira</i> sp.	MAKI (1954)
<i>Micrococcus</i>	<i>M. candidus</i>	TOERIEI (1967a, b)
	<i>M. luteus</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>M. varians</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962), TOERIEI (1967a, b)
	<i>M. ureae</i>	TOERIEI (1967a, b)
	<i>Micrococcus</i> sp.	KOTZÉ <i>et al.</i> (1968)
<i>Nelisseria</i>	<i>N. catarrhalis</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962)
<i>Purcellobacterium</i>	<i>P. intermedium</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>P. colliforme</i>	TOERIEI (1967b)
<i>Proteus</i>	<i>P. vulgaris</i>	TOERIEI (1967b)
<i>Pseudomonas</i>	<i>P. aeruginosa</i>	TOERIEI (1967a)
	<i>P. ambigua</i>	TOERIEI (1967a)
	<i>P. denitrificans</i>	BURBANK <i>et al.</i> (1966)
	<i>P. oleovorans</i>	TOERIEI (1967a)
	<i>P. perolens</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>P. pseudomallei</i>	TOERIEI (1967a)
	<i>P. reptillivora</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962), TOERIEI (1967b)
	<i>P. riboflavina</i>	TOERIEI (1967b)
	<i>Pseudomonas</i> spp.	BURBANK <i>et al.</i> (1966), HATTINGH <i>et al.</i> (1967)
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	<i>R. rubrum</i>	KOTZÉ <i>et al.</i> (1968) TOERIEI (1967a, b)
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	<i>R. rubrum</i>	TOERIEI (1967b)
<i>Sarcina</i>	<i>S. cooksonii</i>	COOKSON and BURBANK (1965), BURBANK <i>et al.</i> (1966)
	<i>S. lutea</i>	MCCARTY <i>et al.</i> (1962)
<i>Serratia</i>	<i>S. indicans</i>	BURBANK <i>et al.</i> (1966)
<i>Streptococcus</i>	<i>S. diploidus</i>	BUCK <i>et al.</i> (1953)
<i>Streptomyces</i>	<i>S. bikiniensis</i>	TOERIEI (1967b)

ทำให้สร้างผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ เช่น บิวทานอล เอทานอล กรดแลคติก นอกจากนี้แบคทีเรียพวกเอซิโตจีนิค (H_2 -producing acetogenic bacteria) สามารถใช้กรดโวลาทิลที่มีขนาดใหญ่กว่ากรดอะซิติกได้ดีเท่ากับผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ที่ปล่อยออกมาโดยแบคทีเรียประเภทอื่นในการสร้างกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน รูป 3.1 ปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซไฮโดรเจน เรียกว่า ไฮโดรเจนโนเจนเนซิส (hydrogenogenesis) อันที่จริงเรายังไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรด และที่สร้างไฮโดรเจนได้อย่างชัดเจน เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดได้ แต่แบคทีเรียที่สร้างกรดอาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจน เราจึงอาจจัดว่าแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่สร้างกรด อย่างไรก็ตามแบคทีเรียทั้งสองชนิดนี้ อาจเรียกรวมกันได้ว่าเป็น Non Methanogenic Bacteria ซึ่งผลจากเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียเหล่านี้ คือ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ถ้าไม่ได้สร้างไฮโดรเจน น้ำที่ผ่านขั้นตอน Non-Methanogenic Phase จะยังมีสปีสเตรตเหลืออยู่เกือบเท่าเดิม การที่สปีสเตรตถูกกำจัดออกไปเป็นส่วนน้อยมาก เพราะ อิเล็กตรอนที่อยู่ในสปีสเตรตเดิมจะถูกส่งต่อไปให้กับสารอินทรีย์ที่ยังคงอยู่ในน้ำที่ส่วนของสปีสเตรตที่ลดน้อยไปมักเป็นผลมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ (microbial inefficiency) ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปของสารอินทรีย์เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการสร้างไฮโดรเจน อิเล็กตรอนจะถูกส่งให้กับไฮโดรเจนไอออน ทำให้กลายเป็นก๊าซหนีออกจากระบบ



การสร้าง H_2 จึงเป็นการลดจำนวนอิเล็กตรอนของสปีสเตรต ทำให้ภาวะออกซิเดชัน (oxidation state) ลดลง ซึ่งเป็นการลดปริมาณสปีสเตรตนั่นเอง

นอกจากนี้ ยังมีแบคทีเรียพวกโฮโมเอซิโตเจนิค (homoacetogenic bacteria) สามารถใช้ CO_2 และ H_2 เปลี่ยนกลับเป็นกรดอะซิติกดังรูปที่ 3.1 แต่แบคทีเรียพวกนี้พบว่า มีปริมาณน้อยจึงเชื่อว่าขั้นตอนดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อระบบกำจัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (7)

3.1.2 ขั้นตอนการย่อยสลายที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Methane Formation หรือ Methanogenic Phase)

ธรรมชาติที่แท้จริงของแบคทีเรียที่มีหน้าที่รับผิดชอบต่อการสร้างมีเทนในปฏิบัติการชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนยังไม่เป็นที่รู้จักแน่ชัด อย่างไรก็ตามก็คิดว่า แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนได้ อาจ

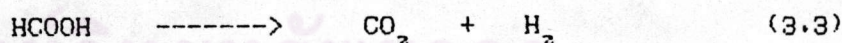
แบ่งได้เป็น 2 ชนิด (ดูรูปที่ 3.1) คือ

- ก) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetoclastic methane bacteria)
- ข) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากไฮโดรเจน (H_2 utilizing methane bacteria หรือ CO_2 -reducing methane bacteria)

แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจากไฮโดรเจน สามารถแยกได้เป็นเชื้อบริสุทธิ์ที่สามารถสร้างพลังงานจากออกซิเดชันของ H_2 ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกยังไม่มีใครแยกเป็นเชื้อบริสุทธิ์ได้ แม้ว่าเราสามารถเลี้ยงเชื้อรวม (enrichment culture) ให้สร้างมีเทนได้จากการบ้อนอะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงอย่างเดียว (8) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จาก H_2 ทุกตัวล้วนแต่เป็น obligate anaerobe ซึ่งไม่สามารถทนต่อออกซิเจนได้เลย และแบคทีเรียพวกนี้จะได้รับพลังงานจาก H_2 และได้คาร์บอนจาก CO_2 ในระหว่างที่มีชีวิตอยู่ มันจะใช้ CO_2 เป็นสารตัวสุดท้ายที่รับอิเล็กตรอน ทำให้ได้มีเทนจากสมการดังนี้



แบคทีเรียชนิดนี้ส่วนใหญ่ จะสามารถใช้กรดฟอร์มิก (formic acid) เพียงอย่างเดียวเป็นสับสเตรตได้ (9) แต่ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า formic acid สามารถถูกย่อยสลายให้กลายเป็น H_2 และ CO_2 ได้ง่าย ดังสมการ (3.3)

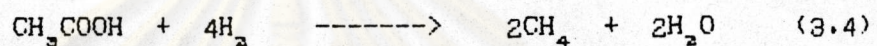


เมื่อมีปริมาณ H_2 สูง (partial pressure สูง) และพีเอชใกล้เคียง 7 แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากไฮโดรเจนสามารถเติบโตได้ดีด้วย ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ประมาณ 0.04 ชม.^{-1} (10) แบคทีเรียพวกนี้ไวต่อพีเอชมากและปรากฏว่าพีเอชที่อยู่นอกช่วง 6.7-7.4 จะชลออัตราการเติบโตของแบคทีเรียเหล่านี้ นอกจากนี้แล้วเนื่องจากแบคทีเรียประเภทนี้จะเป็นแบบสร้างอาหารเอง ค่าของผลผลิตของเซลล์จึงต่ำเสมอ

สำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากอะซิเตตนั้น ตามที่กล่าวมาแล้วว่า เรายังไม่สามารถแยกเชื้อบริสุทธิ์ของมันได้ แม้ว่าจะสามารถเลี้ยง enrichment culture ให้สร้างมีเทนได้จากการบ้อนอะซิเตตก็ตาม เชื่อว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก ส่วนมากจะสามารถสร้างมีเทนได้จาก H_2 ด้วย นอกจากนี้แล้วแบคทีเรียประเภทหลังนี้ (พวกที่สร้างมีเทน

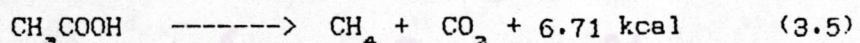
จากกรดอะซิติก) มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด(maximum specific growth rate) ต่ำกว่า ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจาก H_2 แต่มันสามารถทนต่อการปรากฏของ DO ได้ดีกว่า แม้ว่ามันจะเป็น obligate anaerobe ก็ตาม

แม้จะเป็นที่ทราบกันมานานแล้วก็ตามว่ากรดอะซิติก เป็นสารต้นกำเนิดที่สำคัญของการสร้างมีเทนในปฏิบัติการไม่ใช้ออกซิเจนก็ตาม ความสำคัญที่เกี่ยวข้องกันของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนทั้งสองประเภทในการใช้กรดอะซิติกยังไม่เป็นที่ทราบ ข้อเท็จจริงที่ว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้จาก H_2 ไม่สามารถใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ไม่ได้หมายความว่ามันจะไม่สามารถใช้กรดอะซิติกในการสร้างมีเทน ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียเหล่านี้สามารถใช้กรดอะซิติกเป็นสารตัวสุดท้ายที่รับอิเล็กตรอน ทำให้ได้มีเทนเป็นผลปฏิกิริยาดังสมการ (3.4)



ด้วยเหตุนี้กรดอะซิติกจึงสามารถถูกใช้เป็นสารต้นกำเนิดของมีเทน ในขณะที่แบคทีเรียประเภทที่สร้างมีเทนทำการกำจัด H_2 ที่สร้างโดยแบคทีเรีย ประเภทที่ไม่สร้างมีเทน ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดการสะสมตัวของก๊าซ H_2 เพราะการสะสมตัวของ H_2 จะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนนั่นเอง

แบคทีเรียที่ใช้กรดอะซิติกในการสร้างมีเทนก็มีบทบาทสำคัญในปฏิบัติการแบบไม่ใช้ออกซิเจนเช่นกัน ทั้งนี้เพราะการทดลองที่ใช้กัมมันตภาพรังสี เป็นตัววัดร่องรอย (tracer) ในการใช้ enrichment culture ที่เลี้ยงให้เติบโตบน benzoate ได้ชี้ให้เห็นว่ามีเทนส่วนใหญ่ได้มาจากการแตกตัวของกรดอะซิติกและส่วนที่เหลือของมีเทนที่ถูกสร้างขึ้นได้มาจาก CO_2 (11)



สมการที่ (3.5) ชี้ให้เห็นว่าต้องมีแบคทีเรียชนิดที่สามารถเปลี่ยน methyl group ของอะซิเตตให้เป็นมีเทนได้ แม้ว่าธรรมชาติของมันจะยังไม่เป็นที่ทราบก็ตาม อนึ่งมีข้อสังเกตว่าพลังงานที่ได้จากการทำให้อะซิเตตแตกตัวเป็นก๊าซมีเทนตามสมการ(3.5) แทบจะไม่พอที่ใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (12) (ตามทฤษฎีของ thermodynamics สามารถพิสูจน์ได้ว่าสมการ(3.5) อาจไม่สามารถให้พลังงานพอเพียงกับการเติบโตของเซลล์) ข้อสังเกตข้อนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าเมื่อ enrichment culture ถูกเลี้ยงด้วยกรดอะซิติกจะมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำ และ เชื่อว่าในถังปฏิกริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกเป็นพลังงานอาศัยอยู่ด้วย

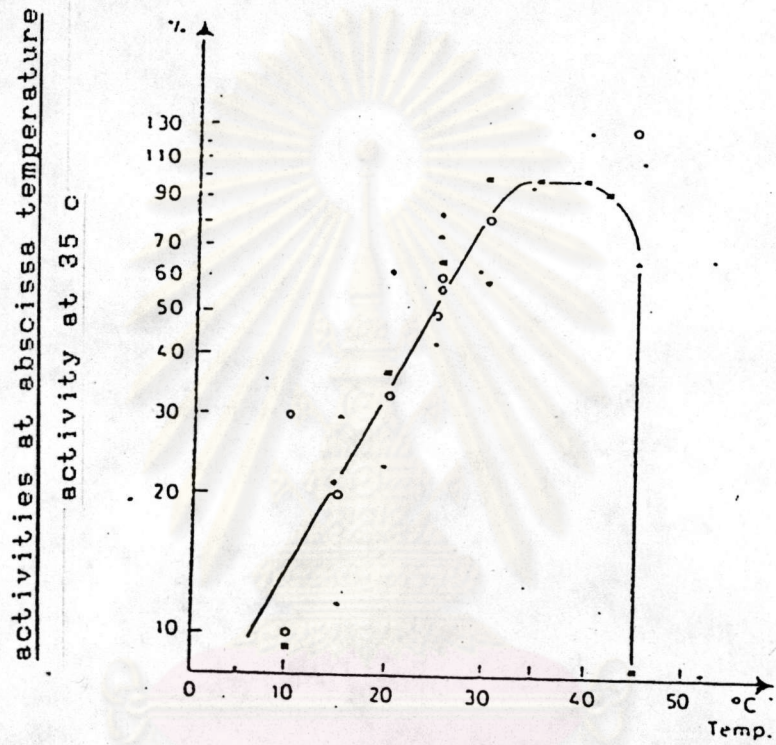
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

3.2.1 อุณหภูมิ

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าการย่อยสลายอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมี อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ 30-40 °C สำหรับมีโซฟิลิคแบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria) และ 45-55 °C สำหรับเทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria) โดยทั่วไปมักนิยม ให้ถึงหมักทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 30-35 °C (13) ซึ่งเป็นช่วงของมีโซฟิลิคเพราะการใช้ อุณหภูมิ สูงไม่ให้เกิดคัมค่าและผลการทำงานก็มักไม่ได้ดีเท่าที่ควร จากรูปที่ 3.2 แสดงปริมาณการผลิตก๊าซ มีเทนสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 37 °C

3.2.2 พีเอช กรดไวลาไทล์และสภาพความเป็นด่าง

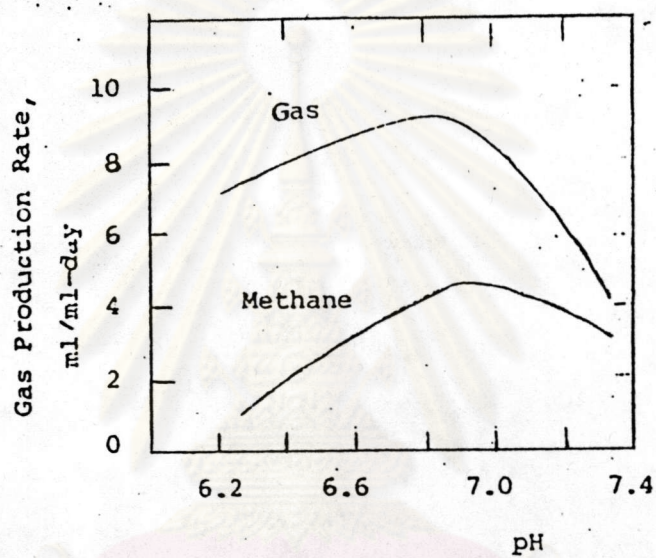
พีเอชของแบคทีเรียที่ทำงานได้ โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5-9 แต่แบคทีเรียที่ สร้างก๊าซมีเทนจาก H_2 มีความไวต่อพีเอชมาก โดยที่การเจริญเติบโตของมันจะเกิดได้ภายใน ช่วงพีเอชระหว่าง 6.5-7.7 (13) รูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อแบคทีเรียที่ สร้างมีเทนจาก H_2 จะเห็นว่าการสร้างก๊าซมีเทนแทบจะหยุดที่พีเอช 6.2 ในทางปฏิบัติ การ รักษาพีเอชในระบบจึงควรให้พีเอชอยู่ในช่วงประมาณ 7 เพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองประเภทที่อยู่ใน ระบบทำงานได้ดี การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดจากสาเหตุ หลัก 2 ประการ คือ จากน้ำเข้าโดยตรง และจากการสร้างกรดไวลาไทล์ในขั้นตอน Non Methanogenic phase โดยทั่วไปปริมาณกรดไวลาไทล์ในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนประมาณ 50-500 มก./ล. (ในรูปของกรดอะซิติก) หากปริมาณของกรดไวลาไทล์มีค่ามากกว่า 2,000 มก./ล. อาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง อย่างไรก็ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ของกรดไวลาไทล์ จะมีความสำคัญมากกว่าเนื่องจากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วของความ เข้มข้นของกรดไวลาไทล์ แสดงว่ามีอะไรบางอย่างเกิดขึ้นกับแบคทีเรียชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในระบบ และอาจทำให้ระบบเสถียรและล้มเหลวได้ ดังนั้นในระบบกำจัดแบบไม่ใช้ ออกซิเจนควรมีกาลังบัฟเฟอร์ที่เพียงพอ โดยทั่วไปสภาพความเป็นด่างควรมีประมาณ 1,500 -2,000 มก./ล. (ในเทอมของแคลเซียมคาร์บอเนต) และ อัตราส่วนของกรดไวลาไทล์ต่อสภาพ ความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตน้อยกว่า 0.4 (14) ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่า ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำมากและพีเอชสามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็ว ถ้ากรดไวลาไทล์เพิ่ม ขึ้นแม้แต่เพียงเล็กน้อย สภาพความเป็นด่างภายในถังหมักส่วนหนึ่งมาจาก สภาพความเป็นด่าง ที่เติมลงไปหรือที่มีอยู่ในน้ำเสียสู่ถังหมักโดยตรง และอีกส่วนมาจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ที่เป็นสารประกอบโปรตีนดังสมการ 3.6 (15)



- Kennedy and Van Den Berg 1981
- ▲ Slander 1967
- Van Den Berg 1977
- Lettinga 1978
- Lawrence 1971
- ◆ O'Rourke 1976

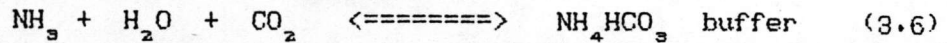
รูปที่ 3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ activity ของแบคทีเรีย (7)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 อิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน (13)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ไบคาร์บอเนต (bicarbonate) สภาพความเป็นด่างและร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ 3.7 (16)

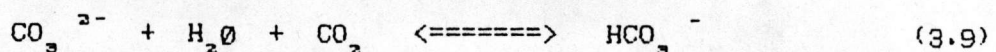
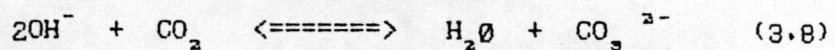
$$\text{pH} = 5.41 - \log(\% \text{CO}_2) + \log(\text{HCO}_3^-) \quad (3.7)$$

หน่วยของ (HCO_3^-) คือ mg/l as CaCO_3

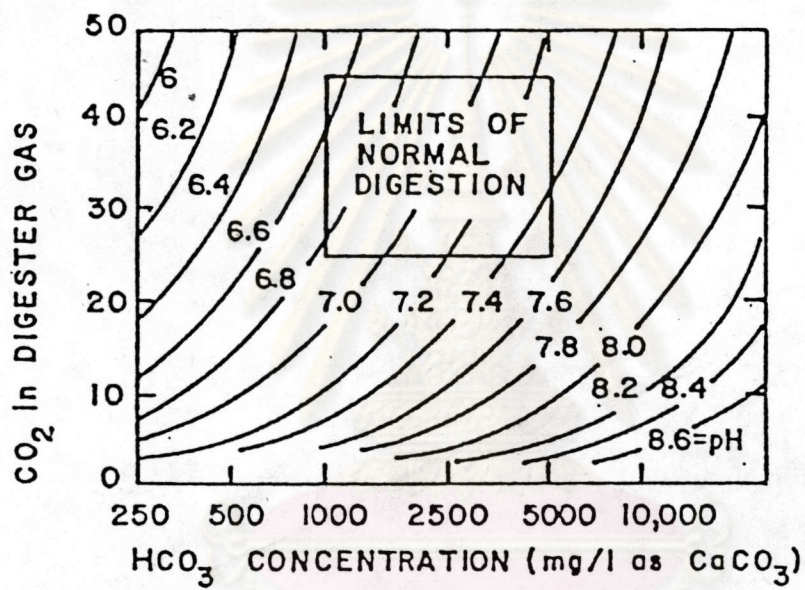
Mccarty (17) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมและเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังหมัก ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสภาพความเป็นด่างไม่ควรต่ำกว่า 1.000 มก./ล. ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อไม่ให้พีเอชต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อจุลชีพในระบบ

3.2.2.1 การควบคุมพีเอช

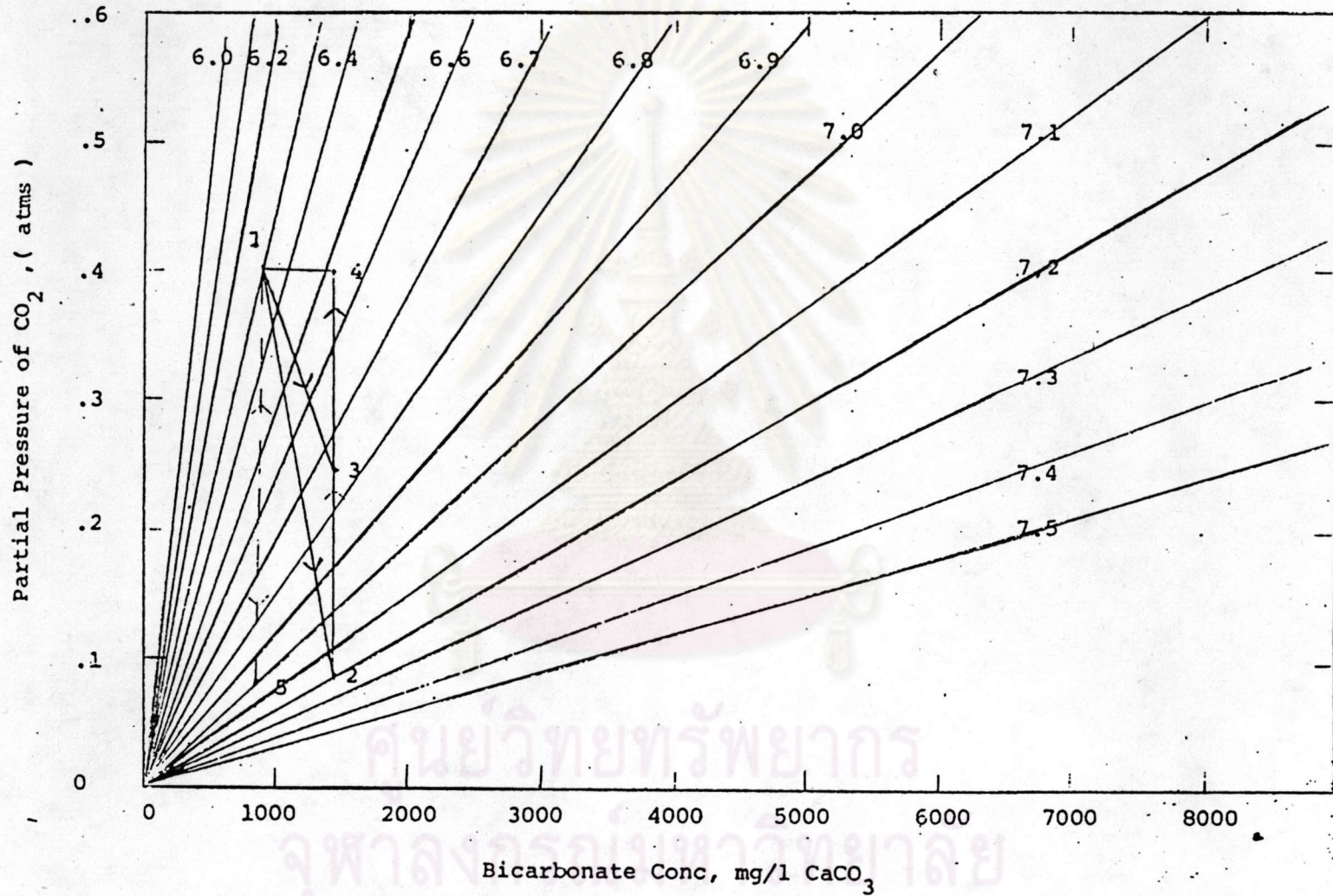
โดยปกติการปรับพีเอชของระบบให้สูงขึ้นจนเป็นกลางจะใช้สารเคมีที่เป็นด่าง ได้แก่ ด่างแก่ (Strong bases) ไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนต นอกจากนี้การกำจัด CO_2 ออกจากก๊าซชีวภาพ (ลด Partial Pressure ของ CO_2) ก็เป็นวิธีควบคุมพีเอชแบบหนึ่งด้วย แต่เป็นการแก้ปัญหาเพียงชั่วคราวเท่านั้น ถ้าควบคุมพีเอชด้วยการเติมด่างแบบทีละเท (batch) เช่น NaOH หรือ Na_2CO_3 สมดุลย์ทางไอออนิก (Ionic Equilibrium) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และ CO_2 จะถูกดึงออกจากก๊าซเข้าไปทดแทนส่วนที่อยู่ในน้ำที่เกิดปฏิกิริยาไปกับด่างที่เติมลงไป เพื่อสร้าง Bicarbonate Alkalinity ที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเติมภาวะของถังหมักที่อยู่ตำแหน่ง (1) ในรูปที่ 3.5 การเติม NaOH ทำให้ Partial Pressure ของ CO_2 ลดลง และไบคาร์บอเนตในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ตามสมการที่ (3.8), (3.9)



จุดสมดุลจะเลื่อนไปอยู่จุด(2) แต่อย่างไรก็ตามก็เรียกจะสร้าง CO_2 ขึ้นใหม่ทำให้ Partial Pressure ของ CO_2 เพิ่มขึ้นไปที่ระดับเดิม จุดสมดุลจึงเลื่อน



- รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช, ปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมและเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ภายในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (18)

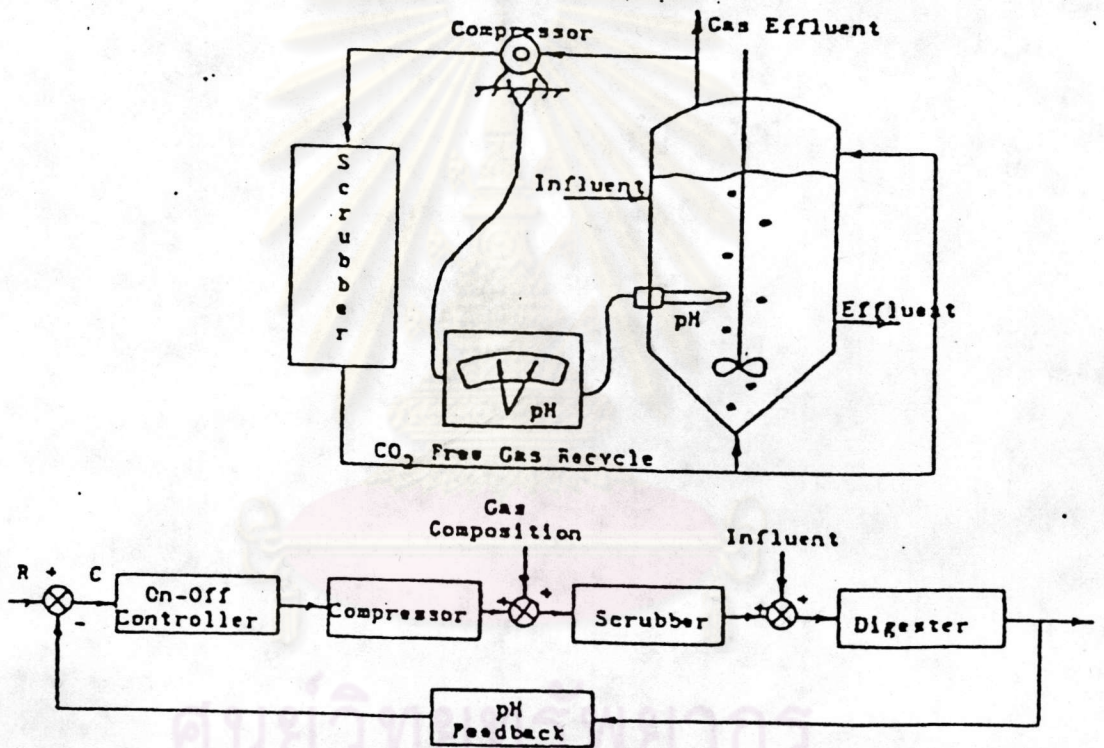


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีระหว่าง CO₂ , pH และสภาพความเป็นด่างของถึงหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (13)

จากจุด(2) ไปอยู่จุด(4) เป็นผลให้พีเอชลดลงทั้งที่สภาพความเป็นต่างยังคงเดิมอยู่ ถ้า Na_2CO_3 มีจำนวนโมลเท่ากับต่างแก่ถูกเติมลงไปแทน จุดสมดุลย์จะเลื่อนจากจุด (1) ไปจุด (3) ก่อนที่จะไปที่จุด (4) ในทางตรงกันข้าม ถ้า NaHCO_3 จำนวนเท่า ๆ กันถูกใช้แทน สมดุลย์จะเลื่อนโดยตรงจากจุด (1) ไปยังจุด (4) เพราะว่า CO_2 จะไม่ถูกใช้ในการสร้างไบคาร์บอเนต วิธีสุดท้ายซึ่งเป็นการดึง CO_2 โดยตรงจากก๊าซในถังหมัก อาจจะใช้วิธีใด ๆ ก็ตาม จะทำให้ Partial Pressure ของ CO_2 ลดลงโดยตรง จุดสมดุลย์จะเลื่อนจากจุด(1)ไปจุด(5) แต่อย่างไรก็ดี แบคทีเรียจะสร้าง CO_2 ขึ้นมาอีกทำให้สมดุลย์เลื่อนกลับไปที่จุด(1)ใหม่อีก แต่ถ้าการดึงก๊าซในถังหมักผ่าน Scrubber อย่างต่อเนื่องเพื่อกำจัด CO_2 ออกก่อนแล้วหมุนเวียนก๊าซซึ่งปราศจาก CO_2 กลับเข้าสู่ถังหมักใหม่จะช่วยทำให้พีเอชของน้ำเสียสูงขึ้น และ เป็นการเพิ่มความเสถียรภาพให้แก่ระบบได้ ดังรูปที่ 3.6

3.2.2.2 ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้สารเคมีเพื่อควบคุมพีเอช

การเลือกใช้สารเคมีชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต้องพิจารณาสองอย่าง ปัจจัยแรกที่ต้องพิจารณาก็คือผลของการเติมสารเคมี สารเคมีที่จับ CO_2 ทำให้พีเอชสูงเกินกว่าต้องการก่อนเสมอ จากนั้น CO_2 ที่คายออกมาโดยแบคทีเรียจะทำให้พีเอชค่อยลดลงไปจนถึงจุดที่ต้องการ ถ้าปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้มีปริมาณมาก การเติมลงไปทีเดียวเลยอาจทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นสูงจนถึงระดับที่อาจเป็นพิษได้ ด้วยเหตุนี้การเติมสารเคมีที่จับ CO_2 จึงต้องค่อย ๆ เติมทีละชั้นและทีละน้อยเพื่อให้มีเวลาที่จะเกิดสมดุลของ CO_2 ในแต่ละครั้งของการเติมสารเคมี ทำให้ระดับพีเอชไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนการเติมไบคาร์บอเนตโดยตรงนั้นไม่มีผลแบบที่กระตุ้นกับการเติมสารจับ CO_2 ทำให้สามารถเติมสารเคมีและปรับพีเอชได้ละเอียดและแม่นยำขึ้นมาก ปัจจัยที่สองที่ต้องพิจารณาในการเลือกชนิดของสารเคมีที่ต้องใช้ก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำ ยกตัวอย่างเช่น สารประกอบโซเดียมสามารถละลายน้ำได้ดีภายใต้สภาวะปกติของถึงปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนสารประกอบแคลเซียมจะละลายน้ำได้น้อยกว่าเพราะ CaCO_3 จะเป็นตัวจำกัดความสามารถในการละลายน้ำภายในช่วงพีเอชระหว่าง 6.9-7.5 ในขณะที่ Ca(OH)_2 ถูกเติมเข้าไปในถังหมัก มันจะจับ CO_2 และเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนต อย่างไรก็ตาม แคลเซียมไบคาร์บอเนตมีขีดจำกัดในการละลายน้ำ ด้วยเหตุนี้ เมื่อสภาพเป็นด่างแบบไบคาร์บอเนตถึงระดับ 500-1,000 มก./ล. การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์(ปูนสุก) เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดการกำจัด CO_2 ออกจากก๊าซโดยที่สภาพความเป็นด่างไม่ได้เพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากเกิดตะกอนของ CaCO_3 การลดลงของ Partial Pressure ของ CO_2 จะทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากสภาพความเป็นด่างไม่ได้เพิ่มตามด้วยจึงทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นทันทีที่แบคทีเรียสร้าง CO_2 ออกมาเพิ่มขึ้นพีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าปูนขาว(ปูนสุก)ถูกเติมเข้ามาอีก ปรากฏการณ์ดังกล่าวก็จะเกิดขึ้น



รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานของระบบหมักแบบไม่ใช้อากาศโดยดึงก๊าซผ่าน Scrubber (19)

อีก จะเห็นว่าการเติมปูนขาวทำให้พีเอชแปรเปลี่ยน ซึ่งเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียและยังเป็นการเพิ่มตะกอน(แคลเซียมคาร์บอเนต)ที่ต้องการกำจัดออกมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ปูนขาว (lime) จึงไม่ควรใช้ในการควบคุมพีเอช ถ้าระดับของพีเอชต่ำกว่าและถ้าจำเป็นต้องใช้ปูนขาวต้องไม่เติมให้พีเอชสูงเกินกว่า 6.7 หรือ 6.8 (16) ดังรูปที่ 3.7 เพราะถ้าเติมปูนขาวเกินกว่านี้ ปูนขาวจะรวมตัวกับ CO_2 เกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ง่าย (17) ปัญหาที่เกิดกับสารประกอบแคลเซียมทำให้เห็นได้ว่าสารประกอบโซเดียมเป็นสารเคมีที่ใช้ควบคุมพีเอชได้เหมาะสมกว่ามาก นอกเหนือจากนั้นเมื่อนำข้อดีนี้ไปรวมกับข้อดีที่ได้จากการเติมไบคาร์บอเนตโดยตรง ทำให้เห็นได้ชัดว่าการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตในการควบคุมพีเอชจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดแม้ราคาของมันจะแพงกว่าปูนขาวก็ตาม

การคำนวณหาปริมาณของสารเคมีที่ต้องการใช้ในการเพิ่มความเป็นด่าง ระบบถังหมักสามารถทำได้โดยใช้สมการเหล่านี้

$$N = (\Delta \text{alk})(E)(V) \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$N = \text{ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้เติมลงไป (กิโลกรัม)}$$

$$\Delta \text{alk} = \text{ปริมาณไบคาร์บอเนตที่ต้องการเพิ่มขึ้น (มก./ล. ในรูปของ CaCO}_3)$$

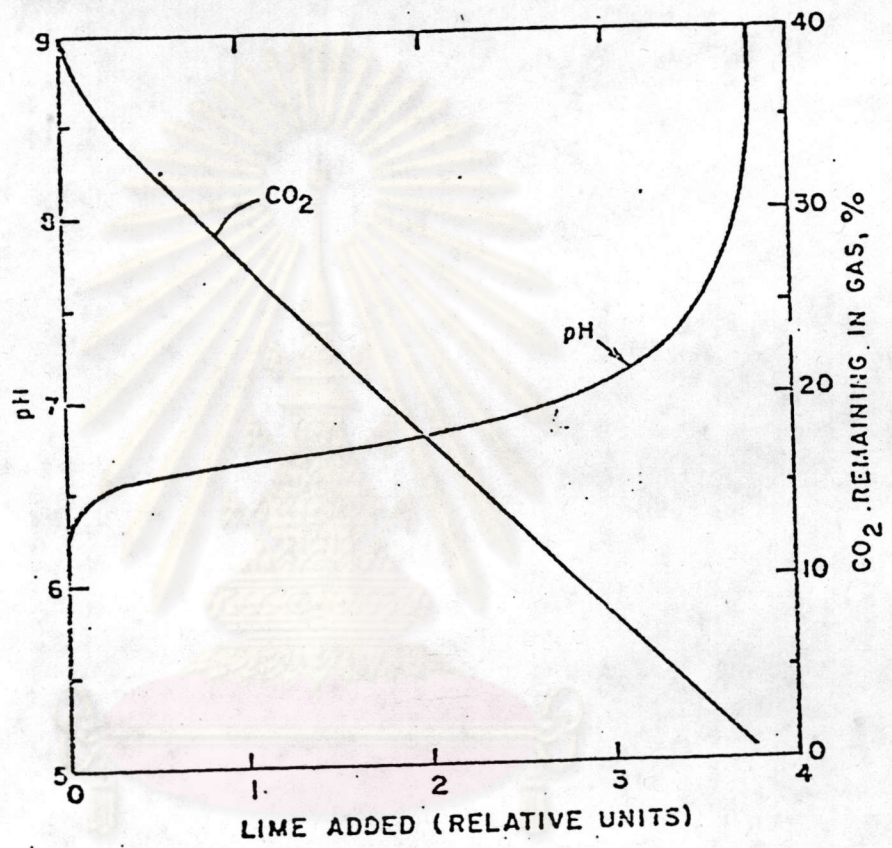
$$E = \text{น.น. สมมูลย์ของสารที่ต้องเติมลงไป/50}$$

$$V = \text{ปริมาตรของตัวถัง (Digester volume), พันลูกบาศก์เมตร}$$

จากการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหา total alkalinity และ volatile fatty acid ของน้ำเสียในถังหมักที่มีพีเอชเท่ากับ pH_1 สามารถคำนวณหา bicarbonate alkalinity ในถังหมักได้ดังนี้

$$(\text{HCO}_3^-)_1 = \text{total alk} - 0.71 \text{ VFA} \quad (3.11)$$

โดยที่ $(\text{HCO}_3^-)_1 = \text{bicarbonate alkalinity ในถังหมักที่มีพีเอชเท่ากับ } \text{pH}_1$
มีหน่วยเป็น มก./ล. ในรูป CaCO_3



รูปที่ 3.7 ผลของการเติมปูนขาวเพื่อปรับพีเอชในระบบถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (17)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 ความต้องการสารอาหารที่จำเป็น (nutrient requirement)

Speece and McCarty (20) ได้แสดงให้เห็นว่า แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระต้องการธาตุไนโตรเจน เมื่อเทียบกับน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (cell weight/N = 9.4) และ Sanders and Bloodgood (21) ได้ทำการศึกษานพบว่า จุลชีพชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนอิสระต้องการฟอสฟอรัสเท่ากับ 1 ใน 7 ของปริมาณธาตุไนโตรเจน (N/P = 7) นอกจากนี้ McCarty (17) ยังรายงานว่ ปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลชีพต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน ดังนี้ $BOD_5:N:P = 100:1:10.2$

3.2.4 ศักยภาพการให้และการรับอิเล็กตรอน (Oxidation - Reduction Potential)

ตามธรรมชาติของระบบถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการชีวเคมีที่ต่อเนื่องและซับซ้อน ความสำเร็จของการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดจากการทำงานของแบคทีเรียอย่างน้อย 2 ชนิดที่มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ถึงแม้ในปัจจุบันยังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จริง ๆ ก็ตาม แต่สิ่งที่นักวิจัยเชื่อว่าเกิดขึ้นอย่างแน่นอนในขบวนการกำจัดน้ำเสียและเป็นเหตุทำให้ความเข้มข้นซีโอต์ในน้ำเสียนลดลงคือ มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Redox ซึ่งเกิดจากผลรวมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) ความแตกต่างทางด้านศักยภาพหรือความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองอาจวัดได้ด้วยค่าออกซิเดชัน - รีดักชันโพเทนเชียลหรือเรียกสั้น ๆ ว่า โออาร์พี (ORP) ในกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจนสารรับอิเล็กตรอนได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะซิติก และมีน้ำเสียเป็นสารให้อิเล็กตรอนด้วยเหตุนี้ Redox Potential จึงน่าจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่ง สำหรับใช้ควบคุมระบบการหมักไม่ใช้ออกซิเจนได้

ค.ศ.1906 Spita & Weldert (22) ใช้การวัด ORP. ในงานการกำจัดน้ำเสียครั้งแรกกับระบบแอ็คติเวเต็ดสลัดจ์ ต่อมานักวิจัยอีกหลายคนก็พยายามค้นคว้าปรับปรุงแก้ไขวิธีการนำมาใช้กับงานกำจัดน้ำเสียทั้งระบบที่ใช้ออกซิเจนและระบบถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

หลักการพื้นฐานของเครื่องวัด ORP.

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมือประกอบด้วย

1. Inert metal electrode หรือ Unattackable electrode ซึ่งมักจะใช้ทองคำขาว (Platinum) หรือทอง (Gold)
2. Constant Voltage reference electrode
3. Salt bridge
4. Potentiometer

จะเห็นว่าส่วนประกอบของเครื่องวัด ORP. จะมีส่วนคล้ายกับเครื่องวัดพีเอช แต่จะต่างกันที่เครื่องวัดพีเอชจะใช้ Glass pH. electrode แทน Inert metal electrode ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ทองคำขาวเป็น electrode นักวิจัยหลายคนเห็นว่าการใช้ทองจะมีความไว (Sensitive) ต่อการวัด ORP. มากกว่าทองคำขาว อย่างไรก็ตามยังมีนักวิจัยบางกลุ่มยังไม่พบความแตกต่างระหว่างการใช้โลหะทั้งสองเป็น electrode ค่า ORP. ที่วัดได้จะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง Unattackable electrode และ Reference electrode

ถ้า Reference electrode เป็น Hydrogen gas electrode ค่าที่วัดได้จะเป็นความต่างศักย์มาตรฐาน (E_H) เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน แต่ถ้า reference electrode เป็น Calomel หรือ Silver-Silver Chloride จะต้องมีการแก้ไขข้อมูลก่อน เพราะค่าที่วัดได้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็น Reference electrode เช่น ถ้าใช้ Calomel Reference electrode ค่าที่วัดได้ต้องนำมาแก้ไขให้เป็นความต่างศักย์มาตรฐานตามสมการที่ 3.12

$$E_c = E_H - 244.3 \quad (3.12)$$

$$E_c = E_H - 45 \quad (3.13)$$

ในเมื่อ

$$E_H = \text{ค่า ORP ที่วัดได้เมื่อใช้ } H_2 \text{ reference electrode}$$

$$E_c = \text{ค่า ORP ที่วัดได้เมื่อใช้ calomel reference}$$

electrode

E_{H} = ค่า ORP ที่วัดได้เมื่อใช้ silver-silver chloride reference electrode.

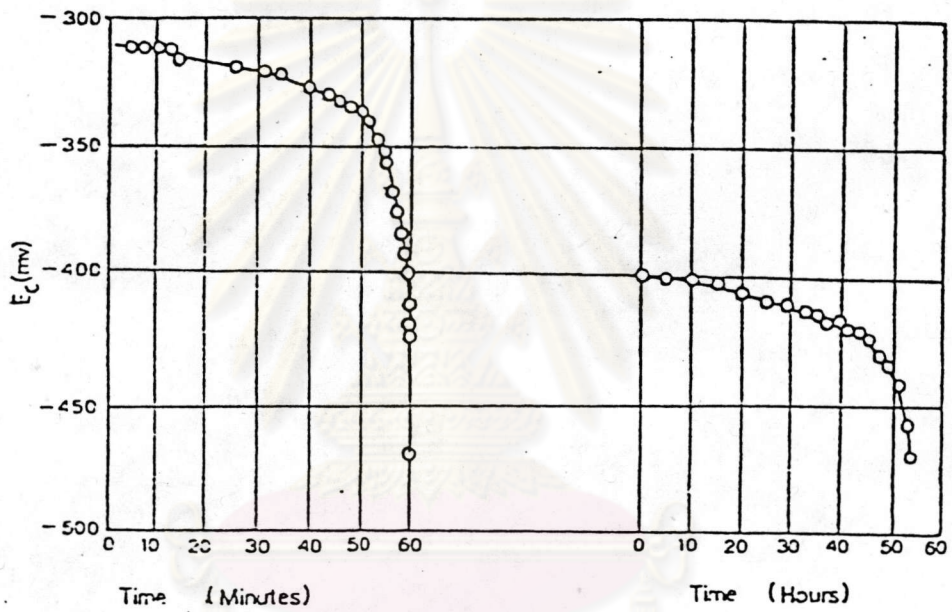
Reed & Orr (23) รายงานว่าค่า ORP. ที่เหมาะสมสำหรับระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีค่า E_{H} เป็น -200 mV. สำหรับแบคทีเรีย 15 ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนพวก Clostridium

Longworth & MacInnes (24) พบว่าค่า ORP. ที่เขาวัดได้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระบวนการสร้างกรดและกระบวนการสร้างมีเทน นอกจากนี้เขายังรายงานจากผลการทดลองของเขาต่อไปอีกว่า ค่า ORP. จะลดต่ำลง (มีค่าติดลบสูงขึ้น) ก่อนที่ระบบจะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดี แต่จากรายงานของคนอื่นพบว่า ORP. ที่วัดได้จะเป็นพารามิเตอร์ที่จะชี้ถึงผลการทำงานของกระบวนการสร้างมีเทน (Methane Fermentation Stage)

Molof (25) พบความผิดพลาดจากการใช้เวลาในการวัด ORP. ที่ต่างกัน จากรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นว่า ค่า ORP. ที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับคาบของเวลา (period) ในการวัด ยิ่งระยะเวลาในการวัด ORP. ที่วัดได้ก็ยิ่งต่ำลงเรื่อย ๆ และลดลงช้าลงเมื่อระยะเวลาการวัดเป็น 10-60 ชั่วโมง Molof รายงานว่า เวลาที่เหมาะสมสำหรับการวัด ORP. ในระบบถังหมักเมื่อติดตั้งเครื่องมือเป็นหน่วยเดียวกับอุปกรณ์ของเครื่องวัด ควรประมาณ 10-48 ชั่วโมง ในระหว่างที่ถังหมักทำงานคงที่ ค่า ORP. ที่วัดได้ค่อนข้างจะคงที่ประมาณ -220 ถึง -290 mV. วัดในเทอมของ E_{H} แต่เมื่อมีการป้อนตะกอนสลัดจ์หรือมีออกซิเจนอิสระเข้าไปในระบบถังหมักโดยไม่ตั้งใจหรือมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของถังหมักอย่างรวดเร็วจะทำให้ค่า ORP. ที่วัดได้สูงขึ้น

จากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า ใช้การวัด ORP. ควบคุมการทำงานของถังหมัก ค่า ORP. ที่วัดได้ในเทอม E_{H} มีค่าระหว่าง -235.7 ถึง -285.7 mV. พบว่าเมื่อมีอากาศเข้าไปในถังหมักและมีการเพิ่มออกซิเจนหรือลดค่า pH อย่างกระทันหันทำให้ค่า ORP. ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้น (ติดลบน้อยลง) จากการลองป้อน Cation ที่เข้มข้นต่าง ๆ เข้าไปในถังหมักจะไม่พบความแตกต่างจากการวัด ORP.

จากรายงานการทดลอง เมื่อกรดโวลลาไทล์มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ค่า ORP. ที่วัดได้จะสูงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อระบบเริ่มกลับทำงานได้ดีขึ้น กรดโวลลาไทล์มีแนวโน้มที่ค่อย ๆ ลดลง ค่า ORP. ที่วัดได้จะค่อย ๆ ลดลง (ติดลบมากขึ้น) เช่นกัน



รูปที่ 3.8 ค่า ORP. ที่ระยะเวลาการวัดต่าง ๆ กัน (25)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



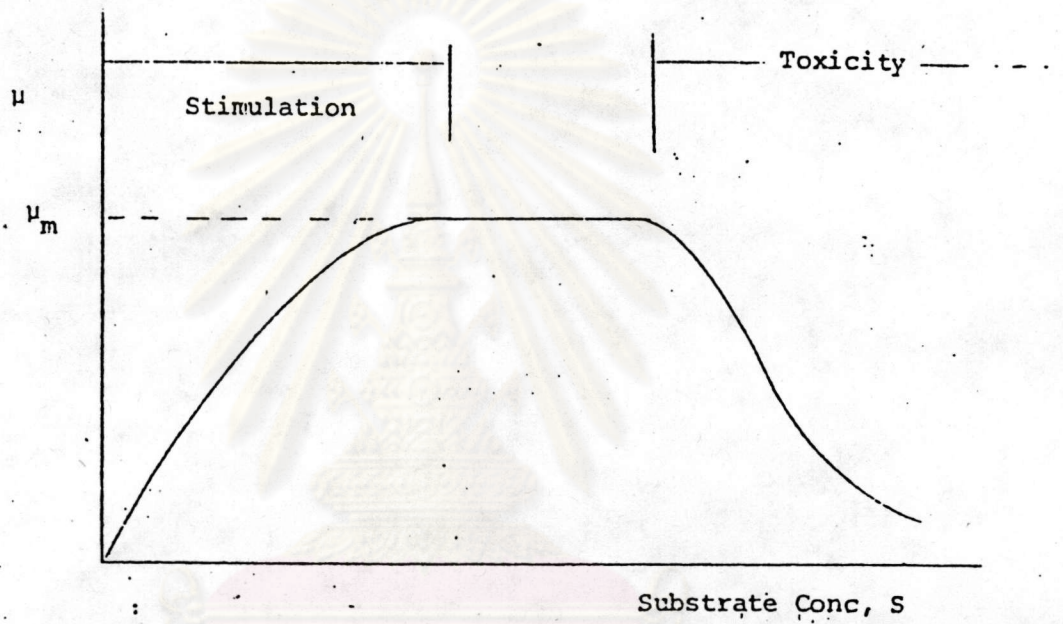
จากงานวิจัยต่าง ๆ ปรากฏว่ามีผู้วัดค่าโออาร์พีในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนได้
ค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับค่าโออาร์พีที่วัดได้ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (37)

ผู้วิจัย	ORP (E_h), mV	หมายเหตุ
Smith & Hungate	-335 ถึง -346	ศึกษาจากการดำรงชีพของมีเทน แบคทีเรีย
Reed & Orr	-200	ศึกษาจากแบคทีเรีย 15 ชนิด จำพวก Clostridium Spp.
Maslova & Pentskhave	-316 ถึง -356	ศึกษาจากถังหมักที่อุณหภูมิต่ำ โมฟีลิกส์
Molof	-220 ถึง -290	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Diresian	-276 ถึง -286	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Hewitt	+50 ถึง -400	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจน
Grune	-130 ถึง -223	ศึกษาจากถังหมักไร้ออกซิเจนที่ รับน้ำเสียจากบ้านเรือน

3.2.5 สารพิษ (toxic material)

สารใดที่เข้าสู่ระบบเมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่งแล้วยังผลให้ประสิทธิภาพหรือ
เสถียรภาพของระบบลดลง สารนั้นจัดว่าเป็นสารพิษ (toxicity) จากรูปที่ 3.9 แสดงอิทธิพล
ของความเข้มข้นของสารใด ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth
rate) ของแบคทีเรียเมื่อสารอาหารอย่างอื่นมีครบถ้วน ด้านซ้ายมือของกราฟเป็นของสมการ
MONOD ซึ่งแสดงว่า อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของสารอาหารจน
กระทั่งถึงจุดหนึ่ง ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะจะมีค่าสูงสุด และไม่เกินกว่านี้คือ อัตรา
การเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด บริเวณกราฟที่ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะขึ้นอยู่กับความ
เข้มข้นของสารอาหารเรียกว่า เขตกระตุ้น (Stimulatory region) ขนาดของเขตกระตุ้น
ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอาหารหรือสารที่กำลังพิจารณา เมื่อสารอาหารเพิ่มขึ้นอีก ค่าอัตราการ
เจริญเติบโตจำเพาะก็ยังคงที่จนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะจะเริ่มลดลงต่ำกว่า



รูปที่ 3.9 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารใด ๆ ที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (13)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด แสดงว่าอาหารเริ่มยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงถือได้ว่าเป็นสารพิษ ความเข้มข้นนี้เป็นเท่าไรขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีพิษนั้น สารหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถแสดงความเป็นพิษได้ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ เช่น กรดโวลลาไทล์, แอมโมเนีย, สารโลหะเบา, สารโลหะหนัก, ซัลไฟด์ เป็นต้น

3.2.5.1 พิษของกรดโวลลาไทล์

กรดโวลลาไทล์เป็นพิษต่อจุลินทรีย์พวกที่สร้างมีเทนเพราะการที่เกิดกรดโวลลาไทล์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้พีเอชลดลง ซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามเมื่อรักษาระดับพีเอชให้คงที่ และใกล้ 7 ปรากฏว่าทั้งกรดอะซิติกและบิวไทริกที่มีความเข้มข้นสูงถึง 10,000 มก./ล. ไม่แสดงความเป็นพิษอย่างเด่นชัดต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจาก H_2 (26) ในทางตรงกันข้าม กรดไพรไพโอนิกที่ระดับเพียง 1,000 มก./ล. แสดงความเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนที่พีเอชเป็นกลาง (26) นอกจากนี้แล้วยังปรากฏว่ากรดไพรไพโอนิกสามารถขลอการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดโวลลาไทล์ได้ด้วย (27, 28) ด้วยเหตุนี้จึงปรากฏว่าเมื่อพีเอชเป็นกลางจะมีแต่เพียงกรดไพรไพโอนิกที่สามารถส่งพิษต่อการทำงานของปฏิบัติการไม่ใช้ออกซิเจนและจะเกิดที่ความเข้มข้นสูงเท่านั้น Kotze และคณะ (29) กล่าวว่าโมเลกุลของกรดอ่อน (weak acid) และด่างอ่อน (weak base) ที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน (ionic form) นั้นสามารถผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้เร็วมาก เช่น กรดอ่อนที่พีเอชต่ำจะไม่แตกตัวเป็นไอออนเมื่อผ่านเข้าเซลล์จุลินทรีย์จะผ่านได้ง่ายทำให้พีเอชภายในเซลล์จุลินทรีย์ลดลงจุลินทรีย์จึงตายและด่างอ่อนที่พีเอชสูงก็ให้ผลเดียวกัน

3.2.5.2 พิษของโลหะเบา

การเติมด่างเพื่อควบคุมพีเอชภายในถังหมักจะต้องกระทำอย่างระมัดระวัง ทั้งนี้เพราะโลหะเบาของด่างสามารถเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โลหะเบาที่แสดงพิษได้แก่ Na, K, Ca และ Mg ถ้าโลหะเหล่านี้ปรากฏอยู่รวมกันมันสามารถส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกันทำให้มีพิษเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ปริมาณความเข้มข้นของสารเหล่านั้น แต่โดยทั่วไปแล้วโลหะเบาเหล่านี้จะแสดงพิษที่ระดับความเข้มข้นสูงเท่านั้นและสามารถเป็นตัวกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะถ้ามีความเข้มข้นต่ำ ตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของ Na, K, Ca และ Mg (17)

ตารางที่ 3.3 อิทธิพลของโลหะเบา (17)

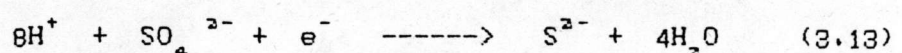
สารประกอบ	ความเข้มข้น		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งอย่างมาก
โซเดียม	100-200	3,500-5,500	8,000
โปแตสเซียม	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม	75-150	1,000-1,500	3,000

3.2.5.3 พิษของโลหะหนัก (heavy metal toxicity)

โลหะหนักที่เป็นพิษจะต้องอยู่ในรูปของสารละลายเท่านั้น ในทางปฏิบัติพิษของโลหะหนักมักจะไม่มีปรากฏอยู่ในถังหมัก เพราะมันสามารถถูกกำจัดออกได้ด้วยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในถังหมัก ถ้าซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเองในถังหมักไม่พอ เราจะเติมเฟอร์รัสซัลเฟตแทนก็ได้ โลหะหนักมีพิษต่อแบคทีเรียทั้งสองประเภทของถังหมักไม่ใช้ออกซิเจนได้ แม้จะมีระดับความเข้มข้นต่ำก็ตาม ดังแสดงในตารางที่ 3.4 (30)

3.2.5.4 พิษของซัลไฟด์ (Sulfide Toxicity)

ซัลไฟด์ (Sulfide) เกิดขึ้นในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยการรีดักชันของซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง (เช่น น้ำทิ้งของโรงผลิตเหล้า) ดังสมการ (3.13) ถ้าความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์มีเกินกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน



ทำให้ระบบล้มเหลว (31) , ความเข้มข้นสูงถึง 100 มก./ล. จะเป็นระดับที่แบคทีเรียทนได้ แต่ถ้าความเข้มข้นสูงถึง 100-200 มก./ล. ซัลไฟด์จะทำให้ประสิทธิภาพของถังหมักลดลงบ้างแต่ไม่มาก เพราะแบคทีเรียจะสามารถต้านทานทางกับซัลไฟด์ที่อยู่ในระดับนี้ได้ดีพอสมควร ซัลไฟด์ใน

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ให้การยับยั้ง 50% ต่อการทำงานของ
ของถึงหมึก (30)

สารประกอบ	ความเข้มข้นอย่างประมาณ (มก./ล.)
Fe^{2+}	1-10
Zn^{2+}	10^{-4}
Cd^{2+}	10^{-7}
Cu^{+}	10^{-12}
Cu^{2+}	10^{-16}

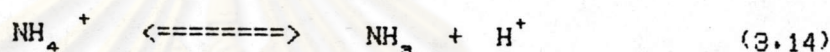
จากการคำนวณพบว่าซิลไฟด์ 0.5 มก./ล. สามารถตกตะกอนโลหะหนักได้ 1 มก./ล.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิออนบวกที่รวมอยู่ ซัลไฟด์ที่เป็นพิษจะอยู่ในรูปของสารละลายซึ่งสามารถเข้าไปในเซลล์ได้ ซัลไฟด์สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้น ดังนั้น การลดพิษของซัลไฟด์จึงทำได้โดยการเติมโลหะหนักในปริมาณที่เหมาะสม , การทำให้น้ำทิ้งเจือจาง หรือ โดยการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำทิ้งก่อนเข้าระบบ

3.2.5.5 พิษของแอมโมเนีย (Ammonia toxicity)

แอมโมเนียเกิดจากการหมักสารพวกที่ประกอบด้วยไนโตรเจน คือ พวกโปรตีนหรือยูเรีย แอมโมเนียอาจอยู่ในรูปของ NH_3 ซึ่งเป็นสารอิสระ หรือ NH_4^+ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่อิสระทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำเสียในระบบ ดังสมการ (3.14)



ถ้าพีเอชน้อยกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวาซึ่ง NH_3 จะยังยั้งการทำงานและเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่า NH_4^+ (17) ถ้า NH_3 มีความเข้มข้นเกินกว่า 150 มก./ล. พิษรุนแรงจะเกิดขึ้น ส่วน NH_4^+ จะต้องมีความเข้มข้นของแอมโมเนียจะสูงถึง 3,000 มก./ล. จึงจะมีพิษเท่ากับ NH_3 ทรายเท่าที่พีเอชเท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ NH_4^+ ดังนั้นพิษของมันแทบจะไม่ปรากฏ แม้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียจะสูงถึง 3,000 มก./ล. ตารางที่ 3.5 แสดงปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบกำจัดน้ำทิ้งแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ตารางที่ 3.5 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบกำจัดน้ำทิ้งแบบไม่ใช้ออกซิเจน (17)

แอมโมเนียไนโตรเจน, (มก./ล.)	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผล
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

3.2.5.6 พิษของสารอินทรีย์ (toxic organic materials)

สารอินทรีย์บางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ (alcohol) กรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (long chain fatty acid) สามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ ความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบกำจัดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แบคทีเรียคุ้นเคยและปรับตัวได้ หรืออาจแก้ไขโดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ

3.3 การใช้ระบบแอนแอโรบิคสับเมอร์เจอร์มในการกำจัดน้ำเสีย

3.3.1 ลักษณะการทำงานของระบบแอนแอโรบิคสับเมอร์เจอร์ม

ระบบแอนแอโรบิคสับเมอร์เจอร์ม จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับระบบแอนแอโรบิคแบบแผ่นจาน กล่าวคือ ภายในถังปฏิกริยาจะบรรจุตัวกลางซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้พลาสติกซึ่งทำจากโพลีเอทิลีน (polyethylene) เนื่องจากมีน้ำหนักเบา อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรตัวกลางมีค่าสูง ความพรุนของตัวกลางสูง ไม่เป็นอันตรายต่อจุลชีพในระบบ ตัวกลางพลาสติกนี้จะมีพื้นที่ผิวให้แบคทีเรียเกาะติดตัวกลางได้ มีผลให้ค่าอายุตะกอนของจุลชีพมีค่าสูง ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของระบบฟิล์มชีวะ (Fixed Film) ในการทดลองระบบแอนแอโรบิคแบบแผ่นจาน (AnRBC) ได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย TAIT AND FRIEDMAN (1) ลักษณะของถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองครั้งนั้น คล้ายกับถังปฏิกริยาในระบบแอโรบิคแบบแผ่นจาน (RBC) จากรูปที่ 3.10 ต่างกันตรงที่ระบบแอนแอโรบิคแบบแผ่นจาน เป็นระบบปิดและมีการจมตัวของแผ่นจานมากกว่าเนื่องจากไม่มีความจำเป็นในแง่ของการถ่ายเทออกซิเจน จากรูป 3.10 จะเห็นว่า ภายในถังปฏิกริยาจะมีแผ่นกั้นเพื่อแบ่งถังปฏิกริยาออกเป็นตอน ๆ ซึ่งคล้ายกับการนำถังปฏิกริยากวนผสมรูปขนาดเล็กหลายใบมาต่อเรียงกันแบบอนุกรม ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบดีกว่าถังปฏิกริยากวนผสมรูปขนาดใหญ่ใบเดียว สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจาก จุลชีพชนิดนั้นๆ ดำรงชีพอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ต้องการ ทำให้จุลชีพในระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ระบบแอนแอโรบิคสับเมอร์เจอร์มนี้อาจจัดได้ว่าเป็นระบบแบบฟิล์มชีวะชนิดหนึ่ง ซึ่งจุลชีพจะเจริญเติบโตโดยเกาะอยู่บนผิววัสดุตัวกลางภายในถังปฏิกริยาและกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ไหลผ่านถังปฏิกริยา ระบบถังปฏิกริยาแบบฟิล์มชีวะเป็นระบบที่มีส่วนประกอบภายในเป็นแบบคนละเนื้อ (heterogenous) เนื่องจากมันไม่ได้รับการกวนน้ำอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้ต้องมีการขนส่ง (transport) สารอินทรีย์จากน้ำไปให้กับจุลชีพที่อยู่บนผิววัตถุ ลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของถังปฏิกริยาแบบฟิล์มชีวะ ทำให้การตอบ

สนองของมันต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างไปจากระบบถังปฏิกิริยาที่มีส่วนประกอบภายในเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ภายในถังปฏิกิริยาที่เป็นแบบเนื้อเดียวกัน จุลชีพออยู่กระจายไปทั่วทั้งถังอย่างสม่ำเสมอทำให้อาจถือได้ว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเฟส (phase) เดียว โดยคิดว่าไม่มีแรงต้านทานการส่งสารอินทรีย์ (อาจกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของสับสเตรตที่ปรากฏต่อจุลชีวมิค่าเท่ากับ ความเข้มข้นของสับสเตรตภายในน้ำ) ในทางตรงกันข้าม ภายในถังปฏิกิริยาแบบฟิล์มชีวะ ความต้องการในการขนส่งสารอินทรีย์จากน้ำไปให้กับฟิล์มชีวะ ทำให้ความเข้มข้นของสับสเตรตอยู่รอบฟิล์มจุลชีวมิค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในน้ำ เนื่องจาก อัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกกำหนดโดยความเข้มข้นของสับสเตรตที่อยู่รอบจุลชีพ จึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงการขนส่งสารอินทรีย์พร้อม ๆ กับการพิจารณาปฏิกิริยาของจุลชีพ เมื่อมีการสร้างโมเดลของถังปฏิกิริยาแบบฟิล์มชีวะ

3.3.2 การศึกษาที่ผ่านมา

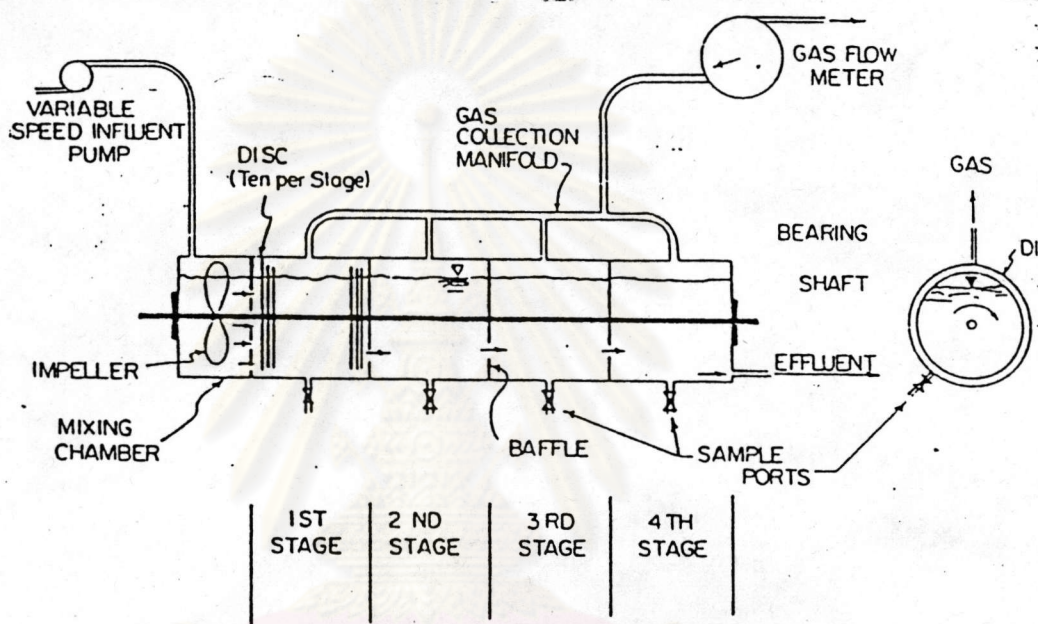
TAIT AND FRIEDMAN (1) ได้พัฒนาระบบแอนแอโรบิคแบบแผ่นจานขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1980 โดยใช้ถังปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.10 และแบ่งการทดลองออกเป็น 8 ชุด ตามตารางที่ 3.6 ตัวกลางเป็นแบบแผ่นจานซึ่งมีพื้นที่ผิวรวม = 1.013 ตร.ม. จำนวน 4 ตอน น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน $TOC:COD:BOD_5 = 1:2.79:1.72$ หมุนด้วยความเร็วรอบ 12 รอบต่อนาที ได้ผลดังนี้

ก. ผลการทดลองที่ 1 ดังรูปที่ 3.11 จะเห็นว่า การกำจัดสารอินทรีย์ประมาณ 80% เกิดขึ้นในตอนหนึ่งโดยที่ ตอนที่สี่ไม่ได้ช่วยในการกำจัดเลย ดังนั้น ตอนที่สี่สามารถตัดออกได้ ประสิทธิภาพการกำจัดในการทดลองนี้ประมาณ 96%

ข. ผลการทดลองที่ 6 ดังรูปที่ 3.12 จะเห็นว่า เมื่อระดับออร์แกนิกโหลดดิ่งเพิ่มจากการทดลองที่ 1 เป็นการทดลองที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบจะลดลงจาก 96% เหลือ 79% ดังนั้นระบบควรมีจำนวนตอนเพิ่มขึ้นจากจำนวน 4 ตอน เพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีขึ้น

ค. ผลการทดลองที่ 4 ดังรูปที่ 3.13 แสดงว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบลดลงเหลือ 46%

ต่อมาในปี ค.ศ. 1986 S.ECHAROS (7) ได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบแอนแอโรบิคสับเมอร์จด์ริ่ม และ ระบบแอนแอโรบิคแบบแผ่นจาน ซึ่งได้ผลพอสรุปคร่าว ๆ ได้ดังนี้



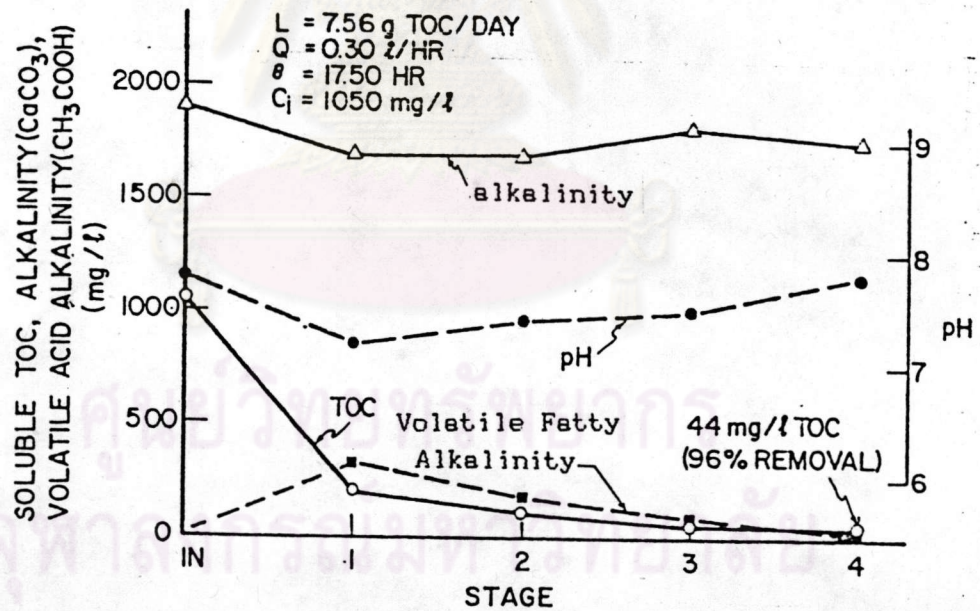
รูปที่ 3.10 ตั้งปฏิบัติการระบบแอนแอโรบิคแบบแผ่นจาน โดย TAIT AND FRIEDMAN (1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

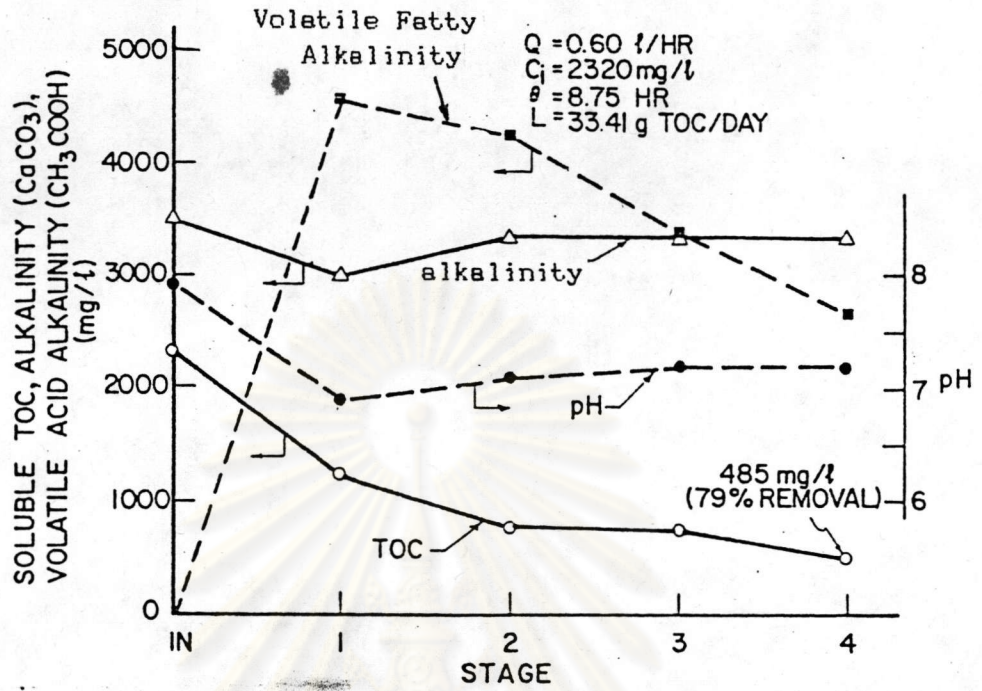
ตารางที่ 3.6 ขอบเขตของการวิจัย AnRBC โดย TAIT AND FRIEDMAN (1)

Flow Rate (Q) l/h	Unit Hydraulic Detention Time (θ) (hr)	Stage Hydraulic Detention Time (θ) (hr)	Influent TOC Concentration mg/l		
			1 075	2 320	3 050
0.30	17.50	4.38	1F-1H (1)	2F-1H (5)	3F-1H (7)
0.60	8.75	2.19	1F-2H (2)	2F-2H (6)	3F-2H (8)
1.20	4.39	1.09	1F-4H (3)	—	—
2.40	2.19	0.55	1F-8H (4)	—	—

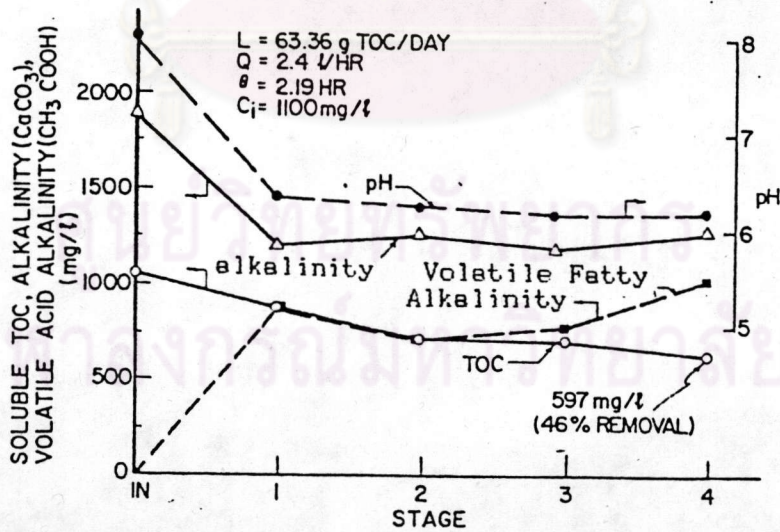
NOTE: Experiment number indicated in parentheses.
 Q = flow rate
 H = influent flow rate
 F = Influent total organic carbon (TOC) concentration



รูปที่ 3.11 การทดลองที่ 1, 1F-1H (1)



รูปที่ 3.12 การทดลองที่ 6 ,2F-2H (1).



รูปที่ 3.13 การทดลองที่ 4 ,1F-8H (1)

ก) เมื่อระดับออร์แกนิกโพลติงสูงขึ้นภายใต้ขอบเขตการวิจัย ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติมีแนวโน้มลดลง

ข) การหมุนเวียนตะกอนกลับ (sludge recycle) จะช่วยให้การกำจัดสารอินทรีย์ดีขึ้น โดยการทดลองครั้งนั้น ไม่ได้ทดลองหาอัตราการหมุนเวียนที่ทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด

ค) จำนวนรอบการหมุนตัวกลางซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบ 1 , 10 รอบต่อนาที จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติ แต่เมื่อแผ่นตัวกลางหยุดนิ่งปรากฏว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จะต่ำลง

ง) เมื่อรักษาระดับออร์แกนิกโพลติงเชิงพื้นที่เท่ากัน ระยะการจมน้ำของแผ่นตัวกลางที่ 50% 70% และ 100% ของพื้นที่หน้าตัดของแผ่นจานหรือสับเมอร์จตุรม จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย