บทที่ 1

บทนำ

ในกระบวนการผลิตกรดมะนาวโดยการหมักจะมีน้ำทิ้งที่เกิดจากการหมักในปริมาณมาก น้ำเสียเหล่านี้จะมีค่า COD สูงมาก น้ำเสียที่เกิดจากการหมักกรดมะนาวนี้จะประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น น้ำตาลที่เหลือจากการหมัก กรดอินทรีย์ต่างๆ เกลือแคลเซียม ฯลฯ ถ้าปล่อยน้ำเสียนี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดเสียก่อนก็จะมีผลทำให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมอย่างรุนแรงได้ ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่างๆ ระบบบำบัดน้ำเสียที่น่าสนใจและนิยมใช้กันมากในปัจจุบันคือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ (biological treatment system) ซึ่งสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพนี้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำกว่าวิธีการบำบัดแบบฟิสิกส์และเคมีในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณสูง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือแบบใช้ออกซิเจน (aerobic treatment) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic treatment)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนเหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำ ส่วนระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงๆ การบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงๆให้ลดต่ำลงอย่างมากก่อน แล้วจึงทำการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนต่อไปซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ลงได้อย่างมากและลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้มากเช่นกัน

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งในปริมาณมากได้ โดยที่จุลินทรีย์จะย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของสารต่างๆ ไปเพื่อใช้ในการเจริญและเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ แต่ปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นจะต่ำกว่าในระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนมากเนื่องจากอัตราการเจริญต่ำ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย เนื่องจากไม่ต้องใช้ระบบในการเติมอากาศ ต้องการธาตุอาหารเสริมสร้าง เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและได้ก๊าซชีวภาพ (biogas)

ซึ่งมีก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ ข้อเสียที่สำคัญของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ช้า เนื่องจากแบคทีเรียมีอัตราการเจริญต่ำมาก และระบบบำบัดจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณน้ำเสีย อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่สำคัญ 3 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลติก (hydrolytic microorganisms) ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน ต่อจากนั้นจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (acidogenic microorganisms) จะทำการย่อยสลายสารเหล่านี้ต่อไปจนได้กรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งจะเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganisms) ต่อไป แบคทีเรียทั้ง 3 กลุ่มนี้จะทำงานร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน เพื่อที่จะรักษาสมดุลของสารอาหาร และภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในถังหมัก และปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักให้สูงขึ้น จึงมีการพัฒนาระบบการบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงขึ้นมา โดยมีหลักการที่สำคัญคือการเพิ่มปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักให้สูงมากขึ้นซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แบคทีเรียเกาะเช่นในระบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter) หรือวิธีตกตะกอนแบคทีเรียแล้วสูบกลับเข้ามาในถังหมักซึ่งได้แก่ ระบบแอนแอโรบิกคอนแทค (Anaerobic Contact) หรือโดยการควบคุมการทำงานของระบบให้แบคทีเรียในถังหมักมีลักษณะเป็นเม็ด (granule) ซึ่งได้แก่ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ; UASB) หรืออาจจะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยอาศัยหลักการเพิ่มกิจกรรมของแบคทีเรียโดยการสร้างภาวะที่เหมาะสมและมีธาตุอาหารเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียแต่ละชนิดเพื่อให้แบคทีเรียในถังหมักทำงานได้อย่างเต็มความสามารถ ซึ่งสามารถทำได้โดยการแยกการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งได้แก่ระบบหมักแบบสองขั้นตอน (two-phase) ซึ่งมีหลักการทำงานของระบบคือใช้ถังหมักสองถังต่ออนุกรมกันและมีการควบคุมภาวะต่างๆ ในถังหมักใบแรกให้เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และขั้นตอนการ

สร้างกรดอินทรีย์ (acidogenesis) ส่วนในถังหมักใบที่สองจะควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างมีเทน (methanogenesis)

1.1 หลักการพื้นฐาน

1.1.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์ การย่อยสลายซัลเฟตและการย่อยสลายไนเตรต

1.1.1.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่สำคัญ 3 กลุ่มทำงานร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยกัน (symbiotic microorganisms) เพื่อที่จะรักษาสมดุลของสารอาหารและภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการทำงานของระบบ เช่น redox potential สมดุลไอออนิก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของไฮโดรเจนในปริมาณต่ำ (Kosaric and Blaszczyk, 1990) ซึ่งจุลินทรีย์ทั้ง 3 กลุ่มนี้ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลติก (hydrolytic microorganisms) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (acidogenic microorganisms) และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganisms) ซึ่งจุลินทรีย์ทั้ง 3 กลุ่มนี้จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่าง (Fongastitkul, Mavinic, and Lo, 1995) ซึ่งขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการสลายโพลีเมอร์ (polymer break-down) ในขั้นตอนนี้สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลาย โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกของเซลล์แบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดไขมัน และกรดอะมิโน ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น เพราะฉะนั้นจึงยังไม่มีการลดปริมาณสารอินทรีย์ (COD) ในขั้นตอนนี้ จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้เป็นจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลติก ซึ่งเป็นจุลินทรีย์พวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจนก็ได้ (facultative anaerobes) เช่น *Bacteroides, Clostridium, Eubacterium, Lactobacillus* เป็นต้นโดยที่

แบคทีเรียแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้ซึ่งสร้างขึ้นจากกระบวนการไฮโดรไลซิสจะถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (acidogens) ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยกระบวนการหมัก (fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัวเช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทิริก (butyric acid) เอธานอล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน Mosey (1983) ได้เสนอว่าผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยานี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน (ดังแสดงในตารางที่ 1.2) กล่าวคือที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ (partial pressure) น้อยกว่า 10^{-6} atm จะเกิดการสร้างก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอะซิติก เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะให้พลังงานปริมาณมากสำหรับการเจริญของแบคทีเรีย และที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนที่สูงกว่าจะเกิดการหมักของกรดไพรูวิกไปเป็นเอธานอล กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริก (Novaes, 1986; Harper and Pohland, 1988) และปฏิกิริยานี้จะเป็นการตอบสนองของแบคทีเรียเมื่อมีการสะสมของไฮโดรเจนมากขึ้นและทำให้ความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกเพิ่มสูงขึ้นในระบบ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และระยะเวลาในการกักเก็บตะกอนแบคทีเรียในระบบสั้นลง (Mosey, 1983) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดนี้จะมีความทนทานต่อภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญสูง โดยเฉลี่ยแล้วสามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าได้ในเวลา 14 ชั่วโมง และสามารถดำรงชีพอยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน (facultative anaerobes) ซึ่งจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ได้แก่ *Aerobacter, Flavobacterium, Pseudomonas* เป็นต้น

นอกจากแบคทีเรียกลุ่ม acidogens แล้ว ในขั้นตอนนี้ยังมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติก (acetogenic bacteria หรือ acetate forming bacteria) หรือแบคทีเรียกลุ่มสร้างไฮโดรเจน (hydrogen forming bacteria) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกให้เป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ (น้อยกว่า 10^{-4} atm) เพื่อการออกซิเดชั่นและการเจริญเติบโต ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติกนี้จะมีระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า (doubling time) เท่ากับ 1.5 ถึง 4.0 วัน (Mosey, 1983) และสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (strictly anaerobes)

ตารางที่ 1.1 แบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่สามารถย่อยสลายสารโพลีเมอร์ชีวภาพ (Hungate, 1957; Dehority and Scolt, 1967; Hazlewood and Edwards, 1981)

Biopolymer	Bacteria
Cellulose	*Ruminococcus flavefaciens*
	Ruminococcus albus
	Clostridium thermocellum
	Bacteroides succinogens
	Acetivibrio cellulotyticus
	Clostridium lochheadii
	Clostridium longisporum
	Clostridium cellobioporus
Hemicellulose	*Bacteroides ruminicola*
	Bacteroides fibrisolvens
	Bacteroides adolescentis
	Bacteroides eggerthii
Lignin (after partially solubilization)	*Methanogenic consortia*
	Pelobacter acidigallici
Pectin	*Lacchnospira multiporus*
	Bacteroides fibrisolvens
	Bacteroides ruminicola
	Bacteroides succinogens
	Clostridium butyricum
	Clostridium multifermentans
Starch	*Streptococcus bovis*
	Bacteroides amylophilus
	Succimonas amylolytica
	Lactobacillus spp.
Lipid	*Anaevibrio lipolytica*
	Bacteroides fibrisolvens
	Butyrivibrio spp.
Protein	*Bacteroides amylophicus*
	Bacteroides ruminicola

ตารางที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจน (ความดันย่อย) และผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Harper and Pohland, 1986)

Culture Condition	Substrate	Hydrogen	Significance of Hydrogen Present
Rumen : dialysis sac	Rumen fluid, H_2	10^{-6} M	Normal methanogenesis
Methanobacterium omelienskii	Ethanol media	0.5 atm	Ethanol degradation inhibited
Sewage digester sludge	Glucose pulses 4.4 g/L	0.01 atm	Propionic acid accumulation to 0.3 g/L, pH drop to 6.6, 3 days to acid conversion and pH recovery
Sewage digester sludge	Glucose pulses 8.8 g/L	0.02 atm	Propionic acid accumulation to 1.2 g/L, pH drop to 6.1, 5 days to pH recovery
Sewage digester sludge	Glucose pulses 13.3 g/L	0.50 atm	Butyric acid accumulation to 1.8 g/L, pH drop to 5.0, no recovery
Sewage digester	Acetic and propionic acid	not reported	Propionate to acetate degradation inhibited under hydrogen atmosphere
Clostidium cellobioparum pure culture	Glucose rumen fluid broth	0.3 atm	H_2 production reduced 50% accumulation butyrate, ethanol, lactate
Sewage digester sludge	Sludge, acetic acid	10^{-4} - 0.015 atm	Linear increase in propionic acid
Sewage digester sludge	Sludge, propionic acid, ethanol	0.005 atm - 0.07 atm	Propionate degradation inhibited, ethanol degradation inhibited
Sewage digester sludge	Wastewater sludge	0.18 atm	Propionic acid degradation inhibited
Thermoanaerobium brockii	Glucose	0.5 atm	Accumulation of lactate, ethanol, H_2 production inhibitded
Sewage digester sludge	Sludge	1.2 μM	Normal operation
Sewage digester sludge	Molasses and yeast	2×10^{-4} - 1.5×10^{-3}	Organic shock was caused H_2 increase followed by propionic acid accumulation
Cattle manure, batch digester	Cattle manure	addition of 70:30 H_2:CO_2	Propionic acid accumulation
Propionic acid enrichment	Propionic acid	6.5×10^{-5}	Normal operation at 8.2 days HRT
		4.3×10^{-5}	Normal operation at 14.5 days HRT

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งได้มาจากกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์นั้นจะเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (methane forming bacteria, methanogenic bacteria หรือ methanogens) ซึ่งจะได้ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยา แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนี้ประกอบด้วยแบคทีเรียที่สำคัญ 2 ชนิดคือ

1) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide - reducing methanogens, hydrogen - utilizing methanogens หรือ hydrogenophilic bacteria) ซึ่งจะผลิตก๊าซมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยไฮโดรเจน (Ditchfield, 1986) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และจะได้พลังงานเพื่อการเจริญจากปฏิกิริยานี้ดังสมการ

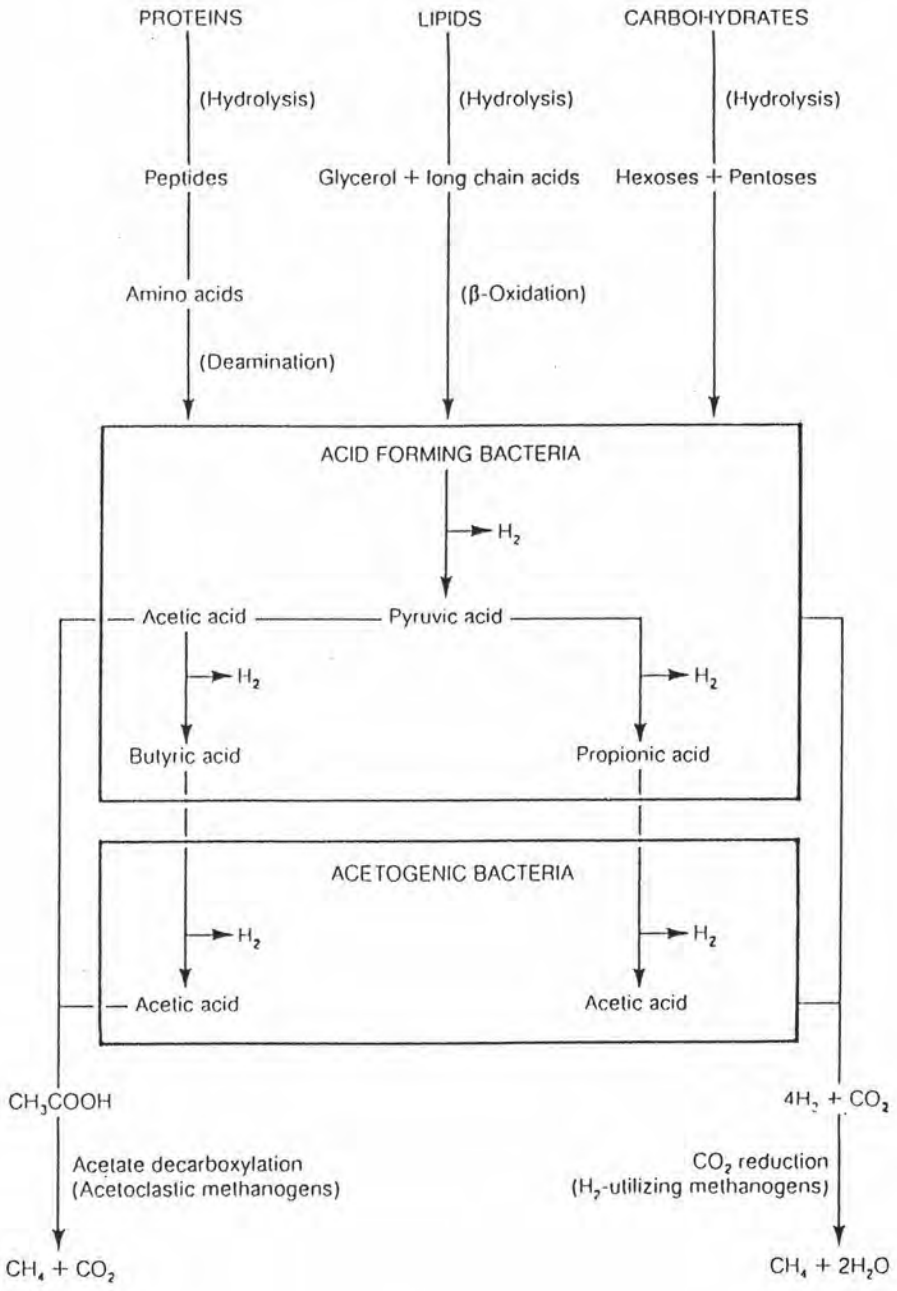
$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad \Delta G^\circ = -136 \text{ KJ}$$

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วโดยมีระยะเวลาในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าประมาณ 6 ชั่วโมง hydrogen - utilizing methanogens มีความสำคัญคือ มันจะควบคุม redox potential ของระบบ (Mosey, 1983) โดยการกำจัดไฮโดรเจนออกไปจากระบบ (ดูรูปที่ 1.1) ซึ่งจะมีผลทำให้กระบวนการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกไปเป็นกรดอะซิติกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น (Ditchfield, 1986) Gonenc and Keresteciogiu (1990) กล่าวว่าระบบจะมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติกและ hydrogenophilic bacteria ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ

2) แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากอะซิเตต (acetoclastic methanogens) จะสร้างมีเทนจากกรดอะซิติกโดยการดีคาร์บอกซิเลชั่น (decarboxylation) ของกรดอะซิติก (Gonenc and Keresteciogiu, 1990) โดยหมู่เมธิล (methyl group) ในกรดอะซิติกจะให้ก๊าซมีเทน และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \qquad \Delta G^\circ = -35.8 \text{ KJ}$$

แบคทีเรียกลุ่มนี้มีการเจริญที่ช้ามาก และไม่สามารถที่จะใช้กรดโพรพิโอนิกหรือกรดบิวทิริกในการผลิตก๊าซมีเทนได้ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อ



รูปที่ 1.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในระดับโมเลกุล (Ditchfield, 1986)

แบคทีเรียกลุ่มนี้ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ในการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบโดยการกำจัดกรดอะซิติกออกไปจากระบบและผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมาด้วย (ดังรูปที่ 1.1) แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะมีความจำเพาะต่อสารตั้งต้น ดังแสดงในตารางที่ 1.3

Ditchfield (1986) กล่าวว่าประมาณ 70 % ของการผลิตมีเทนในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเป็นไปตามกลไกของ acetoclastic bacteria

แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนี้ สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนอย่างสิ้นเชิงเท่านั้น (obligate strictly anaerobes) มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่ำ อัตราการเจริญต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (ดังแสดงในตารางที่ 1.4) และจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างและสารพิษมากที่สุด (Janosz, 1993) นอกจากนี้จะไม่สามารถเจริญได้ดีถ้า redox potential ในสารละลายตัวกลางมีค่าต่ำกว่า - 500 mV และไม่สามารถใช้สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 1 - 2 อะตอมเท่านั้น สามารถจำแนกแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนออกจากแบคทีเรียอื่นได้ เนื่องจากในเซลล์ของมันจะมีโคแฟกเตอร์ที่ประกอบด้วยนิเกิล (nickle - containing cofactors) และมีคุณสมบัติการดื้อสารปฏิชีวนะ (Ditchfield, 1986) แบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Methanosarcina barkeri, Methanobacterium formicicum, M. bryantic, M. thermoautotrophicum; Methanobrevibacter ruminantium, M. arboripholus, M. Smithii; Methanococcus vaniellii, M. voltae; Methanomicrobium mobile; Methanogenium cariaci, M. marinsnigri; Methanospirillium hungatei* และ *Methanothrix* sp. เป็นต้น

การทำงานของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ จะสามารถดำเนินไปได้ด้วยดีขึ้นอยู่กับการทำงานที่สมดุลกันของแบคทีเรียทั้ง 3 กลุ่ม (Zinder, Cardwell, Anguish, Lee, and Koch, 1984) โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนซึ่งมีบทบาทสำคัญที่สุด เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนี้เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของระบบ กล่าวคือการที่ระบบเสียสมดุลหรือล้มเหลวนั้นเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุหลัก 2 ประการคือ อัตราการผลิตกรดอะซิติกสูงกว่าอัตราการใช้กรดอะซิติกโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากอะซิเตต ทำให้มีการสะสมของกรดอะซิติกในระบบมากขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดต่ำลงจนระบบเสียสมดุล และหรือสาเหตุอีกประการหนึ่งคือการที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถรักษาระดับความดันย่อยของไฮโดรเจนในระบบให้อยู่ในระดับที่ต่ำพอได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกในระบบเช่นกัน ตารางที่ 1.5 แสดงการเปรียบเทียบระบบหมักที่สมดุลซึ่งมีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณต่ำ (50 - 300

ตารางที่ 1.3 ความจำเพาะของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่อสารตั้งต้นและไซโตโคม (cytochome) (Stafford, Hawkes, and Horton, 1980)

ชนิดจุลินทรีย์	สารตั้งต้น	presence of cytochome
Methanobacterium thermoautotrophicum	$H_2 + CO_2$	-
Methanobrevibacter arboriphicus	$H_2 + CO_2$	-
Methanococcus vanniellii	$H_2 + CO_2$, HCOOH	-
Methanosporillum hungatei	$H_2 + CO_2$, HCOOH	-
Methanosarcina barkeri	$H_2 + CO_2$, CH_3OH , CH_3COOH , methylamines	+
Methanosarcina mazei	CH_3OH , CH_3COOH , methylamines	+
Methanothrix soehngenii	CH_3COOH	+
Methanolobus tindarius	CH_3OH , methylamines	+
Methanococcoides metyllutens	CH_3OH , methylamines	+
Methanophanus limicola	$H_2 + CO_2$, HCOOH	-

ตารางที่ 1.4 ลักษณะสำคัญของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนภายใต้ภาวะอุณหภูมิปานกลาง (Breure, 1991)

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

ตารางที่ 1.5 เปรียบเทียบค่าดรรชนีในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะปกติและภาวะที่ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงาน (Pohland and Ghosh, 1971)

Digestion Condition	Gas production		Total Alkalinity	Total Organic	Volatile Solids
	ft^3 / VS added	CO_2 (%)	mg / l as $CaCO_3$	Acid , mg / l as CH_3COOH	Conversion %
Normal	8 to 10	25 to 35	1500 to 5000	50 to 300	5 to 60
Retarded	< 7	35 to 45	1000 to 3000	> 2000	< 40

มิลลิกรัม/ลิตร) ซึ่งระบบหมักมีประสิทธิภาพสูงโดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซที่ผลิตได้และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งสูง โดยเปรียบเทียบกับระบบหมักที่เสียสมดุลซึ่งมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงมากกว่า 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซและการกำจัดของแข็งต่ำ

การที่แบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ย่อยสลายสารอินทรีย์ก็เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการเติบโต ซึ่งปฏิกิริยาการสร้างพลังงานส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ พลังงานที่แบคทีเรียนำไปใช้จะอยู่ในรูปของ ATP พลังงานที่แบคทีเรียได้รับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมทั้งภาวะทางกายภาพและทางชีวเคมีของระบบ

พลังงานที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิส เป็นพลังงานที่ยังไม่อยู่ในรูปที่แบคทีเรียจะสามารถนำเอาไปใช้ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนอกเซลล์ ซึ่งหมายความว่าแบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้โดยอาศัยการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เท่านั้น

พลังงานที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์เป็นพลังงานที่อยู่ในรูปที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้ซึ่งพลังงานที่ได้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากตารางที่ 1.6 จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ได้จากกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์จากกลูโคสจะสูงกว่าที่ได้จากกรดอะมิโน

พลังงานจากกระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยที่มีมวลโมเลกุลสูง (กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริก) โดยแบคทีเรียกลุ่ม acetogenic นั้นพบว่า ค่า ΔG° เป็นบวก ซึ่งหมายความว่าภายใต้ภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และที่ความดัน 1 บรรยากาศ) การที่จะเกิดปฏิกิริยานี้ได้ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก หรือปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้าได้นั้นจะต้องอยู่ในภาวะที่มีปริมาณผลิตภัณฑ์ต่ำเท่านั้น ซึ่งในที่นี้ก็คือจะต้องมีไฮโดรเจนในปริมาณต่ำดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เนื่องจากการสร้างมีเทนจากปฏิกิริยาที่คาร์บอนไดออกไซด์รวมกับไฮโดรเจนจะให้พลังงานสูงกว่าปฏิกิริยาที่กรดอินทรีย์เปลี่ยนเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้แบคทีเรียชอบใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในการสร้างมีเทนมากกว่า ดังนั้นโดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบก๊าซไฮโดรเจนแต่จะพบก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า

ตารางที่ 1.6 สมการปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และค่าพลังงานอิสระ (ΔG°) ที่ภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส และ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7) ความเข้มข้นของสารละลาย (aqueous solution) 1 unit activity มีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะก๊าซ (Daniels, Fuchs, Thauer, and Zeikus, 1977; Klass, 1984; Muller, Blaut, and Gottschalle, 1986; Breure, 1991)

Reaction	ΔG° (kJ)
Acidogenic bacteria :	
$(C_6H_{10}O_5) + H_2O = C_6H_{12}O_6$	-17.7
$C_6H_{12}O_6 = 3CH_3CO_2H$	-311.0
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = CH_3CH_2CO_2^- + H^+ + 3CO_2 + 5H_2$	-192.0
$C_6H_{12}O_6 = CH_3CH_2CH_2CO_2^- + H^+ + 2CO_2 + H_2$	-264.0
$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O = 6CO_2 + 12H_2$	-25.9
$2CH_2(NH_2)CO_2H + 4H_2O = CH_3CO_2^- + 2HCO_3^- + H^+ + 2H_2 + 2NH_4^+$	-52.0
$CO_2HCH(NH_2)(CH_2)_2CO_2H + 3H_2O = 2CH_3CO_2^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2 + NH_4^+$	-34.0
$CH_2(NH_2)CO_2H + H_2 = CH_3CO_2^- + NH_4^+$	-78.0
$CH_3CH(NH_2)CO_2H + 3H_2O = CH_3CO_2^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2 + NH_4^+$	+8.0
Acetogenic bacteria :	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O = 2CH_3CO_2^- + 2H^+ + 2CO_2 + 4H_2$	-216.0
$CH_3CH_2CO_2^- + H^+ + 2H_2O = CH_3CO_2^- + H^+ + CO_2 + 3H_2$	+71.7
$CH_3CH_2CH_2CO_2^- + H^+ + 2H_2O = 2CH_3CO_2^- + 2H^+ + 2H_2$	+48.3
$CH_3CH_2OH + H_2O = CH_3CO_2^- + H^+ + 2H_2$	+9.7
$2CO_2 + 4H_2 = CH_3CO_2^- + H^+ + 2H_2O$	-94.9
Methanogenic bacteria :	
$HCO_3^- + H^+ + 4H_2 = CH_4 + 3H_2O$	-136.0
$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O$	-131.0
$CH_3CO_2^- + H^+ = CH_4 + CO_2$	-35.8
$CH_3CO_2^- + H_2O = CH_4 + HCO_3^-$	-31.0
$4HCO_2^- + H_2O + H^+ = CH_4 + 3HCO_3^-$	-134.0
$4CH_3NH_3^+ + 3H_2O = 3CH_4 + 4NH_4^+ + HCO_3^- + H^+$	-225.0

1.1.1.2 <u>ปฏิกิริยาการย่อยสลายซัลเฟต</u> (Sulphate Reduction)

ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซัลเฟตในน้ำเสียสามารถถูกนำไปใช้เป็นแหล่งให้ออกซิเจนได้โดยแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่เรียกว่า sulphate reducing bacteria โดยจะได้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซัลเฟตกับสารอินทรีย์ ดังสมการ

$$SO_4^{2-} + \text{Organic Matter} \xrightarrow{\text{sulphate reducing bacteria}} S^{2-} + H_2O + CO_2$$

เช่นแบคทีเรียพวก *Desulfovibrio* จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

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

$$SO_4^{2-} + CH_3COOH \longrightarrow H_2S + 2HCO_3^-$$

จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยสลายซัลเฟตโดยแบคทีเรียกลุ่ม sulphate reducing bacteria นี้ จะได้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีกลิ่นเหม็นรบกวน โดยมักจะเกิดในท่อระบายน้ำเสียและในบ่อหมักทั่วไป แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียและอุณหภูมิได้ดี ดังนั้นการเกิดกลิ่นเหม็นของไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงเกิดขึ้นได้ทั่วไปไม่ว่าระบบหมักนั้นจะอยู่ในสภาพใดก็ตาม ซึ่งกลิ่นของก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบหมักเป็นกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นั่นเอง การเติมเกลือของเหล็ก (iron salt) เช่น ferric chloride ($FeCl_3$) ลงไปในระบบบำบัด การลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์และการรีไซเคิลน้ำที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ (Gonenc and Keresteciogiu, 1990) เป็นวิธีที่นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ได้ ความรุนแรงของกลิ่นเหม็นจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียนั้น ดังแสดงในสมการเคมีข้างล่างนี้

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

จากสมการจะเห็นได้ว่าภายใต้สภาพที่เป็นกรด ระบบหมักจะมีกลิ่นเหม็นรุนแรงขึ้น ดังนั้นในการควบคุมปัญหากลิ่นเหม็นรบกวนในระบบหมักจึงต้องปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง

ให้สูงกว่า 7 ขึ้นไป ในระบบหมักทั่วไปที่อยู่ในสภาพที่เป็นกลาง (ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7) จะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวระหว่างอิออนของโลหะกับซัลไฟด์เป็นตะกอนสีดำของโลหะซัลไฟด์ จึงทำให้ตะกอนแบคทีเรียในระบบหมักเป็นสีดำ แต่ถ้าในกรณีที่ระบบหมักนั้นมีสภาพเป็นกรดหรืออยู่ในขั้นตอนการสร้างกรดก็จะไม่เกิดการตกตะกอนของโลหะซัลไฟด์ ดังนั้นตะกอนแบคทีเรียจะมีสีเทาและมีกลิ่นเหม็นรุนแรง

1.1.1.3 ปฏิกิริยาการย่อยสลายไนเตรต (Denitrification)

น้ำเสียที่มีสารไนเตรตและอยู่ภายใต้ภาวะไม่ใช้ออกซิเจนจะมีแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างสารประกอบไนเตรตกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ denitrifying bacteria ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ *Achromobacter, Bacillus, Micrococcus* และ *Pseudomonas* ดังตัวอย่างเช่นถ้าสารอินทรีย์เป็นเมธานอล ไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนดังสมการ

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

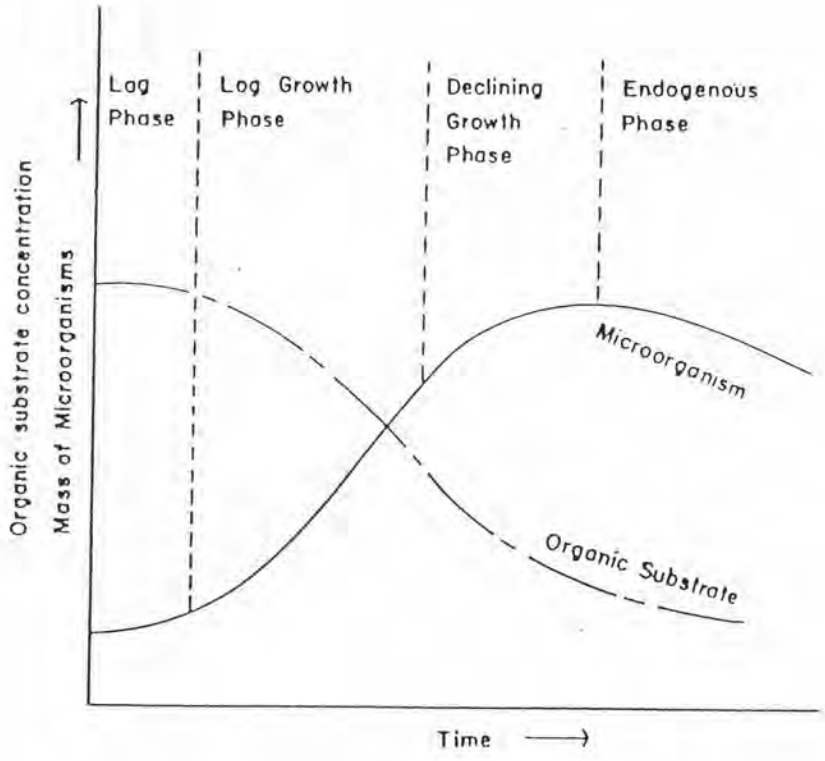
1.1.2 ลักษณะการเจริญของแบคทีเรีย (สุเมธ ชวเดช, 2535)

ในระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการอาศัยการดำรงชีวิตของแบคทีเรียและการเจริญของมันให้ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อให้มีปริมาณน้อยลง ฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงการเจริญของแบคทีเรียภายในระบบบำบัดเพื่อเป็นประโยชน์ในการควบคุมดูแลระบบบำบัด โดยทั่วไปเมื่อแบคทีเรียได้รับอาหารเป็นระยะ ๆ (feed batch) ซึ่งในกรณีนี้ก็คือน้ำเสียที่จะบำบัด แบคทีเรียจะมีสภาพการเจริญซึ่งเมื่อทำเป็นกราฟระหว่างจำนวนแบคทีเรียและเวลาที่ผ่านไปได้ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งลักษณะการเจริญของแบคทีเรียอาจแบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่สำคัญดังนี้

1. Lag phase เป็นช่วงแรกที่แบคทีเรียได้รับอาหารและทำความคุ้นเคยต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งจำนวนของแบคทีเรียและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ถ้ามีสารพิษหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ยากต่อการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ช่วง Lag phase นี้จะยาวนานมากขึ้น ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนพบว่าอัตราส่วนระหว่างอาหารต่อปริมาณแบคทีเรีย (F/M ratio) มากกว่า 2.5 จะเกิด Lag phase ขึ้น

2. Log growth phase เป็นช่วงที่แบคทีเรียคุ้นเคยต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียแล้ว และมีปริมาณอาหารอยู่อย่างมากมาย ดังนั้นอัตราการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียจะสูงขึ้นตลอดเวลา และในขณะเดียวกันอัตราการลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียก็จะสูงขึ้นตลอดเวลาด้วย ซึ่งกิจกรรมในการย่อยสลายในช่วงนี้จะสูงสุด

3. Declining growth phase เป็นช่วงที่สารอินทรีย์ซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียเริ่มน้อยลง ดังนั้นอัตราการเจริญของแบคทีเรียจะต่ำลง และอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จะช้าลงด้วย ส่วนใหญ่ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง Declining growth phase เนื่องจากจุดประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียต้องการความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้มีปริมาณต่ำที่สุด และต้องการให้ได้ก๊าซชีวภาพสูงสุดด้วย



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์และจำนวนแบคทีเรียในถังหมักแบบครั้งคราว (batch reactor) เมื่อเวลาผ่านไป

4. Endogenous phase เป็นช่วงระยะสุดท้ายเมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนเกือบหมด ดังนั้นจึงเกิดสภาพการขาดแคลนอาหาร แบคทีเรียบางส่วนจะตายลดจำนวนลง และจะเกิดกระบวนการย่อยสลายเซลล์แบคทีเรียเอง (cell lysis) สารอินทรีย์จากแบคทีเรียที่ตายลงจะเป็นอาหารให้กับแบคทีเรียที่ยังมีชีวิตอยู่ ดังนั้นแบคทีเรียในช่วงนี้จะมีจำนวนน้อยลง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะต่ำที่สุด ถึงแม้ว่าการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในช่วงนี้จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดก็ตาม แต่มีข้อเสียที่จะต้องออกแบบระบบบำบัดให้มีขนาดใหญ่มาก จึงทำให้ค่าก่อสร้างระบบสูงกว่าการออกแบบให้ระบบหมักทำงานในช่วงอื่นๆ ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป ในกรณีที่โรงงานมีที่ดินมากๆ อาจจะออกแบบบ่อหมักที่มีระยะเวลาในการกักเก็บสูงมาก โดยในบ่อท้ายๆ จะอยู่ในสภาพ Endogenous phase

1.1.3 <u>ชีวเคมีของกระบวนการสร้างมีเทน</u>

การเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น สามารถทำนายปริมาณก๊าซมีเทนที่จะเกิดขึ้นได้จากความรู้ทางเคมีขององค์ประกอบของน้ำเสีย ดังสมการดังต่อไปนี้

$$C_nH_aO_bN_d + \left(n-\frac{a}{4}-\frac{b}{2}+\frac{3d}{4}\right)H_2O \longrightarrow \left(\frac{n}{2}-\frac{a}{8}-\frac{b}{4}-\frac{3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{n}{2}+\frac{a}{8}-\frac{b}{4}+\frac{3d}{8}\right)CO_2 + dNH_3$$

เมื่อพิจารณาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไร้ออกซิเจนดังแสดงในตารางที่ 1.6 พบว่าค่าพลังงานอิสระ (ΔG°) ในปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตต (acetogenesis) นั้นมีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ซึ่งหมายถึงว่าการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะซิเตตและไฮโดรเจนนั้นเกิดขึ้นได้ยาก หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตตจะถูกยับยั้งเมื่อมีปริมาณไฮโดรเจนในระบบสูง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$CH_3CH_2OH + H_2O = CH_3CO_2^- + H^+ + 2H_2 \qquad \Delta G^\circ = +9.7 \text{ KJ}$$

$$CH_3CH_2CH_2CO_2^- + H^+ + 2H_2O = 2CH_3CO_2^- + 2H^+ + 2H_2 \qquad \Delta G^\circ = +48.3 \text{ KJ}$$

$$CH_3CH_2CO_2^- + H^+ + H_2O = CH_3CO_2^- + H^+ + CO_2 + 3H_2 \qquad \Delta G^\circ = +71.7 \text{ KJ}$$

ถ้าหากมีการนำไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไปใช้ตลอดเวลาก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาการนำไฮโดรเจนไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน แสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O \qquad \Delta G^\circ = -131.0 \text{ KJ}$$

และปฏิกิริยา Methanation ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน แสดงในสมการดังนี้

$$2CO_2 + 4H_2 = CH_3CO_2^- + H^+ + 2H_2O \qquad \Delta G^\circ = -94.9 \text{ KJ}$$

ปฏิกิริยาทั้งสองมีค่า ΔG° เป็นลบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตตนั้นไม่สามารถที่จะเกิดขึ้นเดี่ยวๆได้ จำเป็นจะต้องเกิดควบคู่ไปกับปฏิกิริยาการนำไฮโดรเจนไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเสมอซึ่งอาจแสดงได้ดังสมการเทอร์โมไดนามิกส์ดังนี้ (Breure,1991)

ปฏิกิริยา Acetogenesis : $aA + bB \longrightarrow cC + dD$

ที่ภาวะมาตรฐาน : 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ และความเข้มข้นของสารละลาย 1 unit activity

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

เมื่อ K = ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$= \frac{[C]^c_{eq} \cdot [D]^d_{eq}}{[A]^a_{eq} \cdot [B]^b_{eq}}$$

ที่สภาวะการทำงาน :

$$\Delta G = \Delta G^\circ + 2.3\ RT \log \gamma$$

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

เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา acetogenesis ได้ดีนั้น ΔG จะต้องเป็นลบ แต่ ΔG° จะต้องมีค่าเป็นบวก ดังนั้น γ ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในระบบต่ำ (ซึ่งในที่นี้คือ ไฮโดรเจน) ซึ่งจะสามารถเกิดขึ้นได้เฉพาะในกรณีที่มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนร่วมอยู่ด้วยเท่านั้น

1.1.4 <u>ภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน</u>

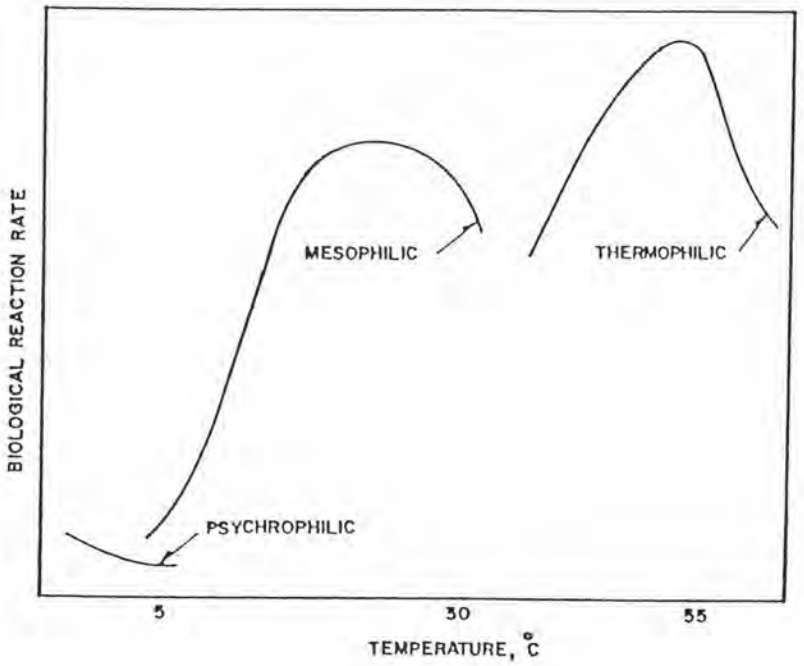
เนื่องจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนประกอบด้วยแบคทีเรียที่สำคัญ 2 กลุ่มคือ แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอินทรีย์และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน โดยที่แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้จะทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องรักษาภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมที่จะทำให้แบคทีเรียเหล่านี้ทำงานร่วมกันได้อย่างดี ซึ่งนอกจากจะต้องรักษาระบบให้อยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ซึ่งได้แก่

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 1.3

1) Psychrophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 5 - 15 องศาเซลเซียส
2) Mesophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 35 - 37 องศาเซลเซียส
3) Thermophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 50 - 55 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปมักจะควบคุมอุณหภูมิในช่วง mesophilic แต่ในประเทศแถบเมืองร้อนเช่นประเทศไทย อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียประมาณ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิภายในถังหมักอาจสูงขึ้นอีก 3 - 5 องศาเซลเซียส จึงใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 37 องศาเซลเซียส ของแบคทีเรียกลุ่ม mesophilic จึงไม่จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีที่อุณหภูมิของน้ำเสียสูงอาจควบคุมอุณหภูมิในช่วง thermophilic ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมคือประมาณ 55 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพของระบบหมักจะสูงขึ้นประมาณหนึ่งเท่าตัวเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.3 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิช่วงต่างๆ

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มาก ช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียคือ ช่วงที่เป็นกลาง (ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6.5 - 7.8) ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบหมักมีค่าต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างนี้ต่ำลงถึง 5.0 จะมีอันตรายอย่างรุนแรงต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอินทรีย์สามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้เมื่อย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นพวกกรดอินทรีย์ ดังนั้นโดยธรรมชาติแล้วจึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ดีกว่าแบคทีเรียโดยทั่วไป ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบหมักมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพความเป็นด่าง และความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในระบบหมักนั้นซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

3. ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

คือความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น ค่าสภาพความเป็นด่างวัดเป็นหน่วย มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต สภาพความเป็นด่างในน้ำจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ซึ่งปริมาณอนุมูลเหล่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นค่าสภาพความเป็นด่างในระบบหมักจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบหมักมีความสามารถในการรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างสูง (buffer capacity) เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างให้คงที่อยู่ได้นานเมื่อมีการเพิ่มของปริมาณกรดอินทรีย์ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างต่ำก็แสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบค่อนข้างสูง จำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมัก เพราะมีความโน้มเอียงที่ระบบจะมีสภาพเป็นกรดได้ง่าย ค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมของระบบหมักคือประมาณ 1,000 - 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในระบบหมักที่ทำงานสมบูรณ์นั้นค่าสภาพความเป็นด่างจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แบคทีเรียขับออกมา ดังสมการ

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow NH_4HCO_3$$

4. กรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acid; VFA)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมีแบคทีเรียที่สำคัญ 2 กลุ่มทำงานร่วมกัน โดยกลุ่มแรกจะย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วปล่อยกรดอินทรีย์ออกมา แล้วแบคทีเรียกลุ่มที่สองจะใช้กรดอินทรีย์เหล่านั้นเป็นอาหารแล้วให้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจะเห็นว่าในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้จะมีกรดอินทรีย์เป็นสารระหว่างปฏิกิริยา (intermediate product) กรดอินทรีย์นี้อาจเกิดการสะสมในระบบได้ในกรณีที่ระบบอยู่ในภาวะไม่สมดุล คือมีการสร้างกรดอินทรีย์มากกว่าการใช้กรดอินทรีย์ ถ้ามีการสะสมกรดอินทรีย์ขึ้นในระบบจะมีผลทำให้ค่าสภาพความเป็นด่างลดลงในช่วงแรกก่อน และค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลงตามมาในที่สุด ในกรณีที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์สูงมากจนค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5 ถ้าไม่ทำการแก้ไข ค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลงจนถึง 4.5 - 5.0 ในที่สุดซึ่งจะทำให้ระบบหมักเกิดสภาพเสียสมดุลระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอน

การสร้างมีเทน ซึ่งสังเกตได้จากมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวรุนแรงและสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำมาก ซึ่งโดยปกติในสภาพของการหมักที่สมบูรณ์ควรมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนประมาณ 70 % (สุเมธ ชวเดช 2529)

กรดอินทรีย์ที่ตรวจพบในระบบหมักส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นกรดอะซิติก ในสภาพค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง กรดเหล่านี้จะอยู่ในรูปอะซิเตต โพรพิโอเนตและบิวทิเรต ดังนั้นความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะต่ำกว่าในรูปของกรดอิสระ ปริมาณกรดอินทรีย์จะวัดเป็นหน่วย มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของกรดอะซิติก โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่อาจทนได้ถึง 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่โดยส่วนมากมักจะควบคุมไม่ให้เกิน 500 มิลลิกรัม/ลิตร

5. ธาตุอาหารเสริม (Nutrients)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนโดยแบคทีเรียนั้น ธาตุที่มีความสำคัญมากต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้แก่ ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) อัตราส่วนของ COD : N : P = 100 : 2.2 : 0.4 หรือ BOD : N : P = 100 : 1.1 : 0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำลง แต่ในทางตรงกันข้ามถ้ามีธาตุไนโตรเจนมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียหรือเปลี่ยนสภาพของแบคทีเรียได้ เช่นทำให้ตะกอนแบคทีเรียลอยตัวหลุดออกจากระบบ นอกจากธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ธาตุอื่นๆ ก็มีความจำเป็นต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โมลิบดินั่ม (Mo) เหล็ก (Fe) ฯลฯ ดังตารางที่ 1.7 แต่แบคทีเรียต้องการสารเหล่านี้ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งโดยทั่วไปธาตุเหล่านี้จะมีเพียงพออยู่แล้วในน้ำเสีย ในทางปฏิบัติจึงคำนึงถึงปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่านั้น ถ้าตรวจวิเคราะห์แล้วมีปริมาณไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเติมให้เพียงพอ

6. สารพิษ (Toxic Substance)

สารอนินทรีย์เกือบทุกชนิดถ้ามีปริมาณมากเกินไปในระบบหมักก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น โดยทั่วไปพวกที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะเป็นพิษรุนแรงกว่าพวกที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำกว่า และอิออนที่มีวาเลนซี (valency) สูงกว่าจะส่งผลเป็นพิษรุนแรงกว่าพวกอิออนที่มีวาเลนซีต่ำกว่า นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวงแหวนเบนซิน (benzene ring) ซึ่งแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ตารางที่ 1.8 แสดงระดับความ

ตารางที่ 1.7 ปริมาณธาตุอาหารรองที่มีความจำเป็นต่อการเจริญของแบคทีเรีย

ธาตุอาหาร	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
โซเดียม	125 - 250
โปแตสเซียม	200 - 400
แคลเซียม	100 - 200
แมกนีเซียม	75 - 125
แอมโมเนีย	80 - 170
เหล็ก	1 - 10
โคบอลท์	1 - 5
ไทอะมีน	1 - 5
กรดเพนโทเทนิค (pentothenic acid)	1 - 5

ความเข้มข้นของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน แต่ในภาวะเป็นจริงปรากฏว่าน้ำเสียมีสารพิษหลายชนิดปะปนอยู่และมีในปริมาณสูง แต่พบว่าน้ำเสียดังกล่าวยังสามารถถูกย่อยสลายในภาวะไม่ใช้ออกซิเจนได้โดยไม่แสดงความเป็นพิษให้เห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย เช่น การตกตะกอนของสารพิษ (precipitation) การถูกทำลายเปลี่ยนไปเป็นสารรูปอื่น และการรวมตัวของอิออนต่างๆ จึงทำให้เกิดสภาพลดหรือเสริมความเป็นพิษ (antagonism and synergism) นอกจากนี้ยังขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบหมักอีกด้วย

7. การเติมน้ำเสีย (Feeding Mode)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักอาจแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ

1. เติมครั้งเดียว (batch)
2. เติมกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous)
3. เติมต่อเนื่อง (continuous)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักแบบต่อเนื่องตลอดเวลาจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะภาวะในถังหมักจะคงที่สม่ำเสมอ ส่วนการเติมน้ำเสียแบบครั้งเดียวนั้นระบบหมักจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากสภาพต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์จะเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 1.8 ระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (สุเมธ ชวเดช, 2529)

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มิลลิกรัม/ ลิตร)
Cu	1.0
Zn	5.0
Cr^{6+}	5.0
Cr^{3+}	2,000
Total Chromium	5.0
Ni	2.0
Cd	0.02
S^{2-}	100
SO_4^{2-}	500
Ammonia	1,500
Na^{+}	3,500
K^{+}	2,500
Ca^{2+}	2,500
Mg^{2+}	1,000
Acrylonitrite	5.0
Benzene	50
CCl_4	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1.0
Chloride	15,000

ตลอดเวลาจึงทำให้แบคทีเรียต้องปรับตัวตลอดเวลา ดังนั้นในทางปฏิบัติมักเลือกวิธีเติมแบบต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีเป็นช่วงๆ ก็จำเป็นต้องใช้วิธีแบบกึ่งต่อเนื่องแทน

8. การกวนผสม (Mixing)

การกวนผสมน้ำเสียในระบบหมักมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบหมักมากเพราะช่วยให้แบคทีเรียมีโอกาสสัมผัสกับอาหารได้ทั่วถึง นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยทำให้สภาพต่างๆ เช่น อุณหภูมิ สารอินทรีย์ ตลอดจนสารพิษกระจายทั่วถึงกันทั้งระบบอีกด้วย การกวนผสมมี 3 วิธีหลักคือ วิธีแรกใช้เครื่องกวนโดยมีใบพัดภายในถัง พบว่าโดยทั่วไปถังหมักจะมีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงและประสิทธิภาพในการกวนผสมยังไม่ทั่วถึง วิธีที่สองเป็นการสูบน้ำภายในถังหมักให้หมุนเวียน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายแต่ประสิทธิภาพในการกวนผสมต่ำ ส่วนวิธีที่สามเป็นการนำก๊าซที่เกิดจากการหมักมาใช้ในการกวนผสม พบว่าเป็นวิธีที่ได้ผลดีสามารถกวนผสมได้ทั่วถึง ดังนั้นในทางปฏิบัติมักนิยมใช้วิธีที่สามนี้

1.1.5 <u>สัญญาณที่เตือนถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน</u>

การเสียสมดุลของระบบจะเกิดขึ้นโดยมีสัญญาณเตือนหลายอย่างดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

โดยปกติระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการทำงานในภาวะที่สมดุล จะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ประมาณ 200 - 400 มิลลิกรัม/ลิตร แต่อย่างไรก็ดีปริมาณของกรดอินทรีย์ยังไม่สำคัญเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรดอินทรีย์ ระบบหมักอาจจะทำงานได้ดีแม้จะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณเตือนให้เห็นถึงการเสียสมดุลเกิดขึ้นกับถังหมัก การเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์อย่างรวดเร็วแสดงว่ามีบางสิ่งเกิดขึ้นซึ่งมีผลทำให้เกิดการชะลอการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน หรือทำให้การเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอินทรีย์ถูกเร่งให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของกรดอินทรีย์ก็มีความสำคัญ เช่นถ้าความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิกสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนและจะไปขัดขวางการทำงานของ acetogenic bacteria ในถังหมัก (Gonenc and Keresteciogiu, 1990) อย่างไรก็ดีถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบหมักมีค่าเป็นกลาง ปัญหาต่างๆ จะเกิดขึ้นน้อยแม้ว่าระดับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์จะสูงก็ตามและโดยทั่วไปแล้วควรตระหนักว่าการที่กรดอินทรีย์มีระดับความเข้มข้นสูงมักเป็นผลมาจากการขาดสมดุลระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิดในระบบ

2. ค่าสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต (Bicarbonate Alkalinity)

ค่าสภาพความเป็นด่างจะบอกให้ทราบว่าในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ในปริมาณเท่าใด เพราะว่าถ้าความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างมากและรวดเร็ว ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างสูงพอ ระบบก็จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบกระเทือนต่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากนัก ค่าสภาพความเป็นด่างขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์สูงก็มีโอกาสที่จะผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากซึ่งอาจเป็นผลให้ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของระบบเพิ่มขึ้นได้ โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 1,500 - 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปัจจัยที่สำคัญกว่าค่าสภาพความเป็นด่างก็คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (มิลลิกรัม/ลิตร ของกรดอะซิติก) ต่อค่าสภาพความเป็นด่าง (มิลลิกรัม/ลิตร ของแคลเซียมคาร์บอเนต) คือ ถ้าอัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูง การเพิ่มของอัตราส่วนนี้เป็นสัญญาณของการเสียสมดุลของระบบและแสดงว่าความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ที่มีอยู่ลดน้อยลงและไม่เพียงพอ แต่ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของกรดอินทรีย์ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วค่าสภาพความเป็นด่างจะเป็นสัญญาณเตือนที่มีความไวมากกว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง

3. ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ใช่สัญญาณที่เร็วพอจะบอกถึงการทำงานที่ผิดพลาดของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ทันท่วงที ทั้งนี้เพราะความเสียหายจะเกิดขึ้นก่อนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลง แต่อย่างไรก็ดีข้อมูลของค่าความเป็นกรด-ด่างก็ยังคงมีความสำคัญ เพราะว่าแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มโดยเฉพาะกลุ่มสร้างมีเทนสามารถเจริญได้ดีในช่วงแคบๆ ของค่าความเป็นกรด-ด่างเท่านั้น ถ้าไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าเป็นกลาง การเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนก็จะถูกยับยั้งทำให้ระบบล้มเหลวได้

4. อัตราการผลิตมีเทน

อัตราการผลิตมีเทนเป็นเครื่องวัดกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนโดยตรงและถือเป็นเครื่องวินิจฉัยประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีความสำคัญมาก

การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตมีเทนมีความสำคัญมากกว่าค่าปริมาณการผลิตมีเทน เพราะเป็นสัญญาณที่บ่งบอกว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

5. องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

การเสียสมดุลของการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มมักจะทำให้อัตราการผลิตมีเทนลดลงและสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในระบบหมักทั่วๆ ไป จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนประมาณ 0.7 (มีก๊าซมีเทนประมาณ 60 % หรือคิดเป็นอัตราส่วน $CO_2 : CH_4 = 2 : 3$) ซึ่งน้ำเสียแต่ละชนิดก็จะให้ค่าที่แตกต่างกันออกไป การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนี้อย่างกระทันหันแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการย่อยสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรดเพิ่มขึ้น (การผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น) ซึ่งสามารถแสดงถึงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นได้ด้วย

1.1.6 <u>สาเหตุของการล้มเหลวของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน</u>

จากการศึกษาถึงปัจจัยของสิ่งแวดล้อมและปัจจัยการทำงาน เพื่อที่จะให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น พบว่าสาเหตุของการล้มเหลวในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีดังนี้คือ

1. การให้ของเหลวเข้าสู่ระบบมากเกินไป (hydraulic overloading)

จะทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บตะกอนแบคทีเรียในระบบลดลงจนถึงจุดที่แบคทีเรียไม่สามารถที่จะเจริญได้ทันก่อนที่จะหลุดออกไปจากระบบ (wash out)

2. การให้สารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไป (organic overloading)

จะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะมีผลไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

3. การให้สารพิษเข้าสู่ระบบมากเกินไป (toxic overloading)

เมื่อมีสารพิษ เช่น โลหะหนัก สารเคมี แอมโมเนียและอิออนบวก เข้าสู่ระบบมากเกินไปจะมีผลไปทำลายแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

1.1.7 <u>ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน</u>

<u>ข้อดี</u>

ก. ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากแบคทีเรียมีอัตราการเจริญต่ำ(Ditchfield, 1986; Svardal, Gotzendorfer, Nowak, and Kroiss, 1993)

ข. ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย เนื่องจากไม่ต้องใช้ระบบในการเติมอากาศ (Svardal *et al.*, 1993)

ค. สามารถกำจัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณสูงมากๆ ได้ดี (Germirli, Orhon, Artan, Ubay, and Gorgun, 1993)

ง. ตะกอนแบคทีเรียในระบบอยู่ตัว เสถียรมากและง่ายต่อการทำให้แห้ง (dewatering)

จ. ต้องการธาตุอาหารเสริมสร้างเช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

ฉ. สามารถเก็บตะกอนแบคทีเรียไว้ได้นานหลายเดือนในภาวะที่ไม่มีอาหาร

ช. ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ (Janosz, 1993)

ข้อเสีย

ก. แบคทีเรียในระบบหมักมีอัตราการเจริญต่ำ

ข. ใช้ระยะเวลานานในการเริ่มต้นระบบหมัก (Start-up)

ค. ระบบบำบัดปรับตัวได้ไม่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณน้ำเสีย อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ

ง. ปริมาณสารอินทรีย์ภายหลังการบำบัดยังคงมีค่าสูงอยู่

จ. เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นและมีสีดำ

1.2 รูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment Systems)

ความสามารถในการรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ หรือประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในถังหมักและปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก ระบบบำบัดแบบดั้งเดิมนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบต่ำ นอกจากนี้ยังไม่สามารถนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น หลักการที่สำคัญของระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง คือการเพิ่มปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบให้สูงขึ้นและการรักษาตะกอนแบคทีเรียให้อยู่ในระบบได้เป็นเวลานาน (ระยะเวลากักเก็บตะกอนแบคทีเรียในถังหมักสูง)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ

(1) ระบบบำบัดแบบดั้งเดิม (Conventional Anaerobic Processes)

(2) ระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง (High-Rate Anaerobic Processes)

1.2.1 ระบบบำบัดแบบดั้งเดิม

1.2.1.1 บ่อหมัก (Cesspool) เป็นบ่อหมักแบบที่เก่าแก่ที่สุดที่ใช้กำจัดน้ำเสียชุมชน มักจะสร้างเป็นบ่อคอนกรีตปิดรูปสี่เหลี่ยมฝืนผ้าอยู่ใต้พื้นดิน เนื่องจากเป็นบ่อที่มีขนาดเล็กและขาดการควบคุมดูแล ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเป็นเพียงขั้นตอนการไฮโดรไลซิส ซึ่งสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะซึมผ่านผนังบ่อลงดิน

1.2.1.2 บ่อเกรอะ (Septic Tank) เป็นระบบที่ออกแบบให้ทำงานคล้ายคลึงกับบ่อหมักแต่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยจะมีท่อต่อจากบ่อเพื่อให้น้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายอยู่ สามารถซึมผ่านลงดินในอัตราที่สูงขึ้น สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์และขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนต่อไปในชั้นดิน

1.2.1.3 บ่อไร้ออกซิเจนหรือบ่อเหม็น (Anaerobic Pond) บ่อหมักนี้เป็นบ่อชนิดเปิดมีความลึกตั้งแต่ 3 เมตรขึ้นไป เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนละลายลงไปถึงส่วนล่างของบ่อ โดยทั่วไปมักเป็นบ่อดิน นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง และโรงงานมีพื้นที่ว่างเปล่าอยู่มาก การควบคุมดูแลง่ายและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ ข้อเสียของระบบหมักนี้นอกจากจะมีประสิทธิภาพต่ำและมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวนแล้วยังสูญเสียก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอีกด้วย

1.2.1.4 ถังหมักแบบดั้งเดิม (Conventional Anaerobic Digestion) เป็นระบบหมักที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดตะกอนแบคทีเรียที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน เช่นระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ถังหมักอาจเป็นถังเดียวหรือสองถัง ตะกอนแบคทีเรียจะถูกย่อยสลายได้ก๊าซชีวภาพ ระบบถังหมักแบบดั้งเดิมนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าบ่อหมักและบ่อเกรอะ แต่อย่างไรก็ตามยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่จึงไม่นิยมนำมาใช้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

1.2.2 ระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง

เป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาในระยะหลัง เพื่อแก้ไขปัญหาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงๆ หลักการเพิ่มประสิทธิภาพคือการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในระบบซึ่งสามารถทำได้คือ หาตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวสูงให้แบคทีเรียเกาะติดเป็นเมือก

หรืออาจตกตะกอนแบคทีเรียที่ออกมากับน้ำล้นจากถังหมักแล้วสูบน้ำตะกอนนี้กลับเข้าถังหมัก หรืออาจควบคุมความเร็วของน้ำเสียที่ไหลผ่านถังหมักให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดที่จับเกาะกันแน่น ระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงได้แก่

1.2.2.1 ระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทค (Anaerobic Contact Process)

ระบบหมักนี้มีความคล้ายคลึงกับระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง แต่ระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทคจะปิดหมดจึงอยู่ในภาวะไร้ออกซิเจน ระบบนี้มีลักษณะที่สำคัญคือแบคทีเรียที่ออกมาพร้อมกับน้ำที่ล้นออกจากถังหมักจะเข้าสู่ถังตกตะกอน และเกิดการตกตะกอนแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นน้ำเสียและจะถูกสูบกลับไปเข้าสู่ถังหมักอีก ดังนั้นแบคทีเรียในถังหมักจะมีปริมาณสูงมาก กล่าวคือมีค่า MLSS สูงถึง 20,000 มิลลิกรัม/ลิตร การแยกตะกอนแบคทีเรียออกจากน้ำเสียโดยทั่วไปจะใช้ถังตกตะกอนซึ่งอาจจะใช้สารพวก flocculant ช่วยในการตกตะกอนหรือใช้ร่วมกับ vacuum degasification หรือการเหวี่ยงแยก (centrifugation) ถังหมักของระบบนี้จำเป็นจะต้องมีการกวนผสมอย่างดีเพื่อให้น้ำเสียสัมผัสกับตะกอนแบคทีเรียอย่างทั่วถึง ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำเอาก๊าซที่เกิดขึ้นกลับมาใช้ในการกวนผสมในถังหมัก (gas recirculation) การใช้การกวนทางกลแบบต่อเนื่องหรือกึ่งต่อเนื่อง หรือการให้น้ำเสียไหลเข้าถังหมักทางด้านล่างขึ้นไปผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรียที่อัดตัวกันอยู่ที่ก้นถังหมักในอัตราการไหลที่เหมาะสม โดยพบว่าการกวนผสมโดยใช้ก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ข้อจำกัดของระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทคคือระยะเวลาในการกักเก็บตะกอนในถังหมักต่ำ (Sludge Retention Time; SRT) ประสิทธิภาพโดยทั่วไปจะสูงเทียบเท่าระบบหมักตัวกลางกรอง ข้อแตกต่างระหว่างระบบทั้งสองคือระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทคนี้มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าและการควบคุมดูแลยุ่งยากกว่าระบบหมักตัวกลางกรอง เนื่องจากต้องมีเครื่องสูบตะกอนแบคทีเรียและเครื่องกวนถังหมัก แต่ค่าก่อสร้างของระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทคจะต่ำกว่าระบบหมักตัวกลางกรอง เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวกลางพลาสติกในถังหมักดังเช่นระบบหมักตัวกลางกรอง

1.2.2.2 ระบบหมักตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter)

เป็นระบบที่ประกอบด้วยถังหมักทรงกระบอกหรือทรงเหลี่ยมรูปทรงสูง ภายในถังหมักบรรจุด้วยตัวกลาง (filter media) ซึ่งตัวกลางจะเป็นวัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (inert material) และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (specific surface area) ซึ่งได้แก่ ทราย หิน ถ่าน หรือตัวกลางที่เป็นพลาสติก (plastic media) โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวกลางที่เป็นพลาสติก แบคทีเรียที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งมีลักษณะการจมตัวที่ดีจะกองตัวอยู่ที่ก้นถังหมัก นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียที่เกาะติดเป็นเมือกหนาบนผิวและในโพรงของตัวกลาง จึงทำให้ค่า SRT ของระบบนี้สูง การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ

สามารถทำได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของถังหมัก ในกรณีที่น้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังหมัก น้ำเสียจะสัมผัสกับตะกอนแบคทีเรียที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นถัง เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ก๊าซชีวภาพ เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำเสียและการที่ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่ด้านบน ทำให้ตะกอนแบคทีเรียลอยขึ้นตามไปด้วย โดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะยังคงถูกย่อยสลายโดยตะกอนแบคทีเรียที่ถูกพาขึ้นมาและแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางที่น้ำเสียนั้นไหลผ่าน เมื่อตะกอนแบคทีเรียลอยขึ้นมากระทบกับตัวกลางก็จะตกลงมายังส่วนล่างของถังหมัก นอกจากนี้ตัวกลางยังทำหน้าที่กระจายการไหลของน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียสัมผัสกับตะกอนแบคทีเรียได้อย่างทั่วถึงมากขึ้นอีกด้วย ระบบตัวกลางกรองนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่เป็น dissolved waste คือมีปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำอยู่ต่ำซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แม้จะใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์และอัตราการไหลที่สูงก็ตาม สำหรับน้ำเสียที่เป็น partially soluble waste ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในระบบนี้เนื่องจากจะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันตามมาได้ ข้อได้เปรียบของระบบตัวกลางกรองเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแอนแอโรบิกคอนแทคคือการออกแบบระบบง่าย ไม่จำเป็นต้องมีการกวนผสมในถังหมัก ไม่จำเป็นต้องมีการนำเอาตะกอนแบคทีเรียหรือน้ำเสียที่ออกจากระบบกลับมารีไซเคิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ มีการสะสมตะกอนของแบคทีเรียในตัวกลางสูง และมีการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียไปกับน้ำเสียที่ออกไปจากระบบน้อยมากทำให้มีระยะเวลากักเก็บตะกอนแบคทีเรียในระบบสูง แต่อย่างไรก็ตามระบบหมักตัวกลางกรองก็มีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับระบบหมักแอนแอโรบิกคอนแทคที่สำคัญคือระบบหมักตัวกลางกรองมีค่าใช้จ่ายสูงมากเนื่องจากตัวกลางพลาสติกมีราคาสูง

1.2.2.3 <u>ระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดเบด</u> (Anaerobic Fluid Bed)

เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดระบบหนึ่ง เนื่องจากสามารถควบคุมให้มีปริมาณแบคทีเรียในระบบสูงถึง 15,000 - 40,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยแบคทีเรียในระบบจะเกาะเป็นเมือกคลุมผิวตัวกลางที่เป็นเม็ดขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร) โดยน้ำเสียจะถูกสูบเข้าถังหมักทางด้านล่างด้วยความเร็วที่พอเหมาะที่จะยกตัวกลางให้ลอยได้ ทำให้การเคลื่อนที่ของเม็ดตัวกลางมากมายเหล่านี้เหมือนการเคลื่อนที่ของของเหลวคือเคลื่อนที่ไปทุกทิศทุกทาง จึงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลทั้งอาหารและผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากปฏิกิริยาชีวเคมีเกิดขึ้นสูงมาก ส่วนบนของถังหมักจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างขึ้น ดังนั้นความเร็วของของเหลวในช่วงบนนี้จะต่ำลง จึงทำให้เม็ดตัวกลางที่มีเมือกแบคทีเรียเกาะอยู่ตกลงมา เฉพาะส่วนน้ำใสเท่านั้นที่จะไหลออกจากถังหมัก เนื่องจากเม็ดตัวกลางเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระ ดังนั้นจึงเกิดการขัดสีและชนกันตลอดเวลา ทำให้เมือกแบคทีเรียบางส่วนหลุดออกไป จึงเป็นการควบคุมความหนาของเมือก

แบคทีเรีย เมื่อกแบคทีเรียที่หลุดติดไปกับน้ำเสียที่บำบัดแล้วจะต้องแยกออกโดยผ่านถังตกตะกอนเสียก่อน ถึงแม้ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ตาม แต่เป็นระบบที่ยุ่งยากในการควบคุมและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงอีกด้วยจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย

1.2.2.4 ระบบหมักยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ; UASB)

เป็นระบบหมักที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่และในปัจจุบันได้รับความนิยมในการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท หลักการทำงานของระบบยูเอเอสบีคือ น้ำเสียจะถูกสูบเข้าสู่ถังหมักทางด้านล่างในความเร็วที่เหมาะสม โดยในถังหมักจะมีชั้นตะกอนแบคทีเรียสองชั้นคือ ชั้นล่างส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิดเม็ด (granular bacteria) เรียกชั้นนี้ว่า sludge bed เป็นชั้นของตะกอนแบคทีเรียที่มีความสามารถในการตกตะกอนสูงและมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงด้วย ส่วนในชั้นที่สองเป็นชั้นของตะกอนเบา (flocculant bacteria) เรียกว่า sludge blanket เป็นชั้นตะกอนแบคทีเรียที่ลอยฟุ้งกระจายเนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายไปเรื่อยๆ เมื่อผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรียเหล่านี้ ช่วงบนของถังจะมีกรวยแยกตะกอน (gas-solid separator) ทำหน้าที่ในการแยกก๊าซชีวภาพออกจากน้ำและตะกอนแบคทีเรีย น้ำใสเท่านั้นที่ไหลล้นออกจากถังหมัก ส่วนตะกอนแบคทีเรียจะตกตะกอนกลับสู่ส่วนที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลาย (ส่วนของตะกอนชั้นล่างและตะกอนลอย) ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการกวนผสมอย่างรุนแรงในถังหมักเพื่อให้น้ำเสียและตะกอนแบคทีเรียสัมผัสกัน แต่อาจใช้การกวนเป็นครั้งคราวหรือการกวนเบาๆ แทน ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดการกวนผสมกันอยู่แล้ว และระบบนี้ไม่ต้องการถังตกตะกอน

การที่มีชั้น scum ที่ผิวหน้าของของเหลวล้นผ่านกรวยแยกตะกอนติดออกมากับน้ำที่ออกจากถังหมัก สามารถป้องกันได้โดยการติดครีบ (baffle) กั้นตรงส่วนทางออก

ในส่วนของกรวยแยกตะกอน ซึ่งเป็นส่วนที่แยกก๊าซและตะกอนออกจากกันนั้นเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของถังหมักยูเอเอสบี ได้มีผู้เสนอให้ใช้เบดแน่น (packed bed) ที่ส่วนบนของถังหมักแทน ซึ่งแนวความคิดนี้ได้มาจากการนำเอาหลักการของระบบยูเอเอสบีรวมกับหลักการของระบบตัวกลางกรอง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกักเก็บตะกอนแบคทีเรียของระบบนี้ต่ำและยังไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน เนื่องจากยากต่อการควบคุมและการออกแบบก่อสร้าง (Lettinga and Hulshoff, 1991)

1.3 การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูง

ถึงแม้ว่าในระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงจะได้มีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในระบบแล้วก็ตาม แต่ก็ยังคงเผชิญกับปัญหาน้ำที่บำบัดแล้วมีคุณภาพต่ำเนื่องจากมีระดับของของแข็งในปริมาณสูงและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำ (Callender, 1983) และเนื่องจากอัตราการเจริญของแบคทีเรียยังต่ำอยู่ ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบนาน ขนาดถังหมักใหญ่ทำให้ค่าก่อสร้างระบบสูง ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มกิจกรรมของแบคทีเรีย (bacteria activity) โดยการสร้างภาวะที่เหมาะสมและมีธาตุอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียและเพิ่มความหนาแน่นของประชากรแบคทีเรียในถังหมัก (Callender, 1983) ในที่นี้จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ไขไว้ซึ่งได้แก่การแยกวัฏภาคในการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 2 ส่วน

1.3.1 การแยกการเกิดปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน (Two-Stage Process)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนคือ ไฮโดรไลซิส การสร้างกรดอินทรีย์และการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนนั้นต่ำกว่าอีกใน 2 ขั้นตอน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วๆ ไป จึงขึ้นอยู่กับขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (แต่ในกรณีของน้ำเสียที่มีสารประกอบพวกเซลลูโลสในปริมาณสูง พบว่าขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย) โดยทั่วไปในระบบบำบัดแบบดั้งเดิมและแบบประสิทธิภาพสูงมักใช้ถังหมักเพียงถังเดียว ซึ่งปฏิกิริยาชีวเคมีทั้งสามขั้นตอนเกิดขึ้นพร้อมๆ กันในถังหมักที่มีการควบคุมภาวะต่างๆ ให้เหมาะสมกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่ำกว่าแบคทีเรียในกลุ่มอื่น อีกทั้งยังมีอัตราการเจริญที่ต่ำกว่า เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและการผลิตก๊าซชีวภาพไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบหมักแบบสองขั้นตอนขึ้นมา

หลักการทำงานของระบบคือ ใช้ถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกันโดยมีการควบคุมภาวะต่าง ๆ ให้ในถังหมักแรก (ถังหมักกรด) เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการสร้างกรดอินทรีย์ (acidogenesis) ส่วนในถังหมักที่สอง (ถังหมักมีเทน) เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis) และขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (methanogenesis) (Gonenc and Kerestecioglu, 1990)

ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันของภาวะการทำงานที่เหมาะสมและอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้นการใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอนทำให้สามารถควบคุมภาวะต่างๆ และอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้ (Henze and Harremoes, 1983; Fongastitkul, Mavinic, and Lo, 1994)

1.3.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน

ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนมีข้อดีเหนือกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวดังนี้ (Ghosh, Conrad, and Klass, 1975)

ก. ลดระยะเวลาทั้งหมดในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ

ข. สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นได้

ค. สามารถป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังหมักกรดได้อย่างต่อเนื่องได้

ง. สามารถปรับภาวะภายในถังหมัก ให้เหมาะสมกับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้

จ. ช่วยลดขนาดของถังหมัก ซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและการดำเนินงานลงได้

ฉ. อัตราการย่อยสลายสูงขึ้น ทำให้อัตราการผลิตและปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย

ช. ลดปริมาณความร้อนที่ต้องการและเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อน (thermal efficiency)

ซ. ลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียที่ออกจากระบบ โดยมีการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายไนเตรต (denitrification) ในอัตราที่สูงในน้ำเสียที่เข้าระบบในถังหมักกรด (Ghosh and Klass, 1977)

ฌ. เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของแข็ง (solid destruction) ในถังหมักกรด (Ghosh *et al.*, 1977)

ส่วนข้อเสียของระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนคือ ต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุมดูแลระบบและต้องเพิ่มเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการตรวจวัด ติดตาม และควบคุมระบบ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบไม่แตกต่างจากระบบบำบัดแบบประสิทธิภาพสูงนัก

1.3.3 เทคนิคในการแยกออกเป็นสองขั้นตอน

จุดประสงค์ในการแยกออกเป็นวัฏภาคการสร้างกรดอินทรีย์ และวัฏภาคการสร้างก๊าซมีเทน เพื่อให้มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทนในปริมาณที่พอเหมาะในถังหมักแต่

ละถัง เพื่อให้ได้อัตราการสร้างกรดและการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดโดยการควบคุมถังหมักแต่ละถังแยกจากกัน แต่อย่างไรก็ตามในถังหมักกรดยังมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอยู่และในทางกลับกันในถังหมักมีเทนก็ยังคงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอยู่ด้วย แต่มิได้เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนตามลำดับ

การแยกออกเป็นสองขั้นตอนสามารถทำได้โดย (Ghosh *et al.*,1975)

ก. ใช้เยื่อไดอะไลซิส (dialysis membrane) โดยที่แบคทีเรียบางชนิดเท่านั้นที่จะสามารถผ่านเยื่อไปได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและเยื่อที่ใช้มีราคาแพงจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้

ข. ใช้ตัวยับยั้งที่เหมาะสมสำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม ตัวยับยั้งได้แก่ ออกซิเจน ไนเตรต ซัลเฟตหรือโลหะ แต่เนื่องจากการหาตัวยับยั้งและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมนั้นทำได้ยาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เช่นกัน

ค. ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูงๆ ซึ่งจะทำให้มีปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักกรดสูง ซึ่งจะมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักโดยตรง

ง. การควบคุมทางจลนพลศาสตร์ (kinetic control) เป็นการควบคุมการทำงานของถังหมักที่อัตราการเจือจาง (dilution rate) และอัตราส่วนการรีไซเคิล (recycle ratio) ซึ่งมักจะใช้อัตราการเจือจางในถังหมักกรดสูง (หรือใช้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย (HRT) ในถังหมักต่ำ) เพื่อทำให้ในถังหมักกรดมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนยาวนานกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด และมีการนำเอาตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักแต่ละถังกลับไปใช้อีก เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในถังหมัก

เทคนิคที่เหมาะสมที่สุดคือ การควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยการใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในถังหมักกรดสูง (HRT ต่ำ) ส่วนในถังหมักมีเทนให้ใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่าในถังหมักกรด (HRT ยาวนานกว่า)

1.3.4 <u>ลักษณะการทำงานของระบบ</u>

เนื่องจากความแตกต่างในลักษณะการเจริญ อาหารที่ต้องการ และภาวะในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน จึงทำให้ต้องมีการแยกปฏิกิริยาการย่อยสลายออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในระบบจะประกอบด้วยถังหมักจำนวนสองถังต่ออนุกรมกัน โดยในถังหมักแต่ละถังจะมีการกวนผสมอย่างดีและมีการควบคุมภาวะต่างๆ รวมทั้งอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้เหมาะสมต่อการเจริญและการทำงานของแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม เพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

ถังหมักกรด เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์เป็นสำคัญ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่คือกรดไขมันระเหย ซึ่งองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยที่ได้นั้นขึ้นกับภาวะในการทำงาน โดยทั่วไปกรดไขมันระเหยที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ประกอบด้วยกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริกเป็นส่วนใหญ่ และมีกรดไขมันระเหยมวลโมเลกุลสูงอื่นๆ อีกเช่น กรดวัลเลอริก (valeric acid) และกรดคาร์โปรอิก (carproic acid) บ้างเล็กน้อย ในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์นั้นจะมีประสิทธิภาพดีก็ต่อเมื่อปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนถูกยับยั้งโดยอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงๆ และมีระยะเวลาในการกักเก็บสั้น การลดระยะเวลาการกักเก็บลงจะเป็นผลให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยที่มีมวลโมเลกุลสูงในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดคือ ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 - 6 และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 38 - 41 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดสามารถทนต่อสภาพที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ ได้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน

ถังหมักมีเทน เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งมีปฏิกิริยาหลัก ๆ อยู่ 2 ปฏิกิริยาคือ ปฏิกิริยาการดึงหมู่คาร์บอกซิลออกจากกรดอินทรีย์ (decarboxylation) โดย acetoclastic methanogens ได้ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ และเกิดจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยไฮโดรเจนโดย hydrogen-utilizing methanogens ได้ก๊าซมีเทนและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างมีเทนนั้นช้ากว่าในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดอินทรีย์มาก ในการทำงานจึงต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่กว่า และมีระยะเวลาในการกักเก็บยาวนานกว่าในถังหมักกรด ปฏิกิริยาต่างๆ ในถังหมักมีเทนสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นก๊าซซึ่งจะถูกดึงออกจากถังหมักได้ตลอดเวลา สำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักมีเทนนั้นควรใช้แบคทีเรียหลายชนิดรวมกัน (mixed culture) เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่แตกต่างกันไป เช่นในกรณีของการย่อยสลายกรดวัลเลอริกนั้น จะต้องใช้แบคทีเรียถึง 3 ชนิดคือ *Mb. suboxydans* สำหรับออกซิไดซ์กรดวัลเลอริกเป็นกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายต่อได้โดยแบคทีเรียชนิดนี้ และ *Mb. propionicum* ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน และ *Methanosarcina methanica* ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยสลายกรดอะซิติกเป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางเสมอ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7 - 8 และอุณหภูมิที่เหมาะสม

ประมาณ 35 - 38 องศาเซลเซียส (Gonenc and Keresteciogiu, 1990) นอกจากนั้นการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนยังสามารถถูกยับยั้งได้เมื่อมีการสะสมของกรดไขมันระเหยเป็นปริมาณมาก

นอกจากนี้ Ghosh และ Klass (1977) ยังได้เสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบสองขั้นตอนไว้ดังนี้

ก. การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสิ่งป้อนในขั้นตอนไฮโดรไลซิสก่อนป้อนเข้าสู่ถังหมักกรด

ข. การแยกเอาก๊าซที่เกิดขึ้นออกจากระบบตลอดเวลา เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซอย่างต่อเนื่อง

ค. การแยกองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกัน โดยนำส่วนที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับเข้าสู่ถังหมักมีเทนอีก เพื่อประโยชน์ในการเกิดปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน (methanation) และเพื่อการกวนผสมในถังหมัก

ง. การเอาน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมารีไซเคิลเข้าสู่ถังหมักกรดอีก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา denitrification และเป็นการลดปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย

จ. การใช้ถังหมักมีเทนมากกว่าหนึ่งถังต่ออนุกรมกัน ซึ่งในแต่ละถังจะเตรียมภาวะที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนแต่ละชนิด เนื่องจากข้อจำกัดในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ดังกล่าวมาแล้ว เพื่อให้เกิดการย่อยสลายกรดอินทรีย์ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

1.4 <u>กระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด</u> (Granulation Process)

ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณแบคทีเรียในระบบ เมื่อในระบบมีแบคทีเรียในปริมาณสูงก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงตามไปด้วย ในการทำให้ระบบหมักยูเอเอสบีมีปริมาณแบคทีเรียสูงได้จำเป็นต้องทำให้เกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดมีความถ่วงจำเพาะสูงทำให้จมตัวได้รวดเร็วดีมากทำให้สามารถอยู่ในถังหมักได้นานซึ่งความเร็วในการจมตัว (settling velocity) จะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดตะกอนแบคทีเรียซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 20 - 90 เมตร/ชั่วโมง (Lettinga, Hulshoff, Grin, de Jong, Roersma, and Ijspert, 1983) ในกรณีที่มีตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดอยู่แล้ว การเริ่มต้นการทำงานของระบบจะไม่ยุ่งยากมากนัก แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่สามารถหาตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดได้ ดังนั้นการเริ่มต้นเดินระบบจะเริ่มต้นโดยใช้ตะกอนแบคทีเรียจากระบบอื่นซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนเบา (flocculant) กระบวนการเปลี่ยนแปลงจากตะกอนเบาเป็นตะกอนเม็ดแบ่งได้เป็น 3 ระยะดังนี้ (สุเมธ ชวเดช, 2530)

1. Wash-Out Stage เป็นช่วงแรกของกระบวนการเปลี่ยนแปลง จำเป็นที่จะต้องใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำๆ คือน้อยกว่า 2 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ในช่วงนี้จะมีการสูญเสียตะกอนขนาดเล็กซึ่งเบาออกไปกับน้ำที่ล้นออกจากระบบตลอดเวลา

2. Transition Stage เป็นระยะที่มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นกว่าในช่วง wash out คือ 2 - 5 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ในระยะนี้จะมีการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงมาก เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงมาก ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวพาตะกอนแบคทีเรียที่เบาออกไปจากระบบ ช่วงนี้เป็นช่วงที่เริ่มเกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด โดยที่ตะกอนแบคทีเรียที่มีน้ำหนักสูงจะไม่ถูกพัดพาออกจากระบบและสามารถเจริญเพิ่มปริมาณมากขึ้น ซึ่งผลจากการคัดเลือกนี้จะทำให้บริเวณส่วนตะกอนชั้นล่างเริ่มปรากฏตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด แต่ข้อสำคัญคือ ต้องไม่ให้อัตราสูญเสียตะกอนแบคทีเรียชนิดเบาสูงกว่าอัตราการเกิดแบคทีเรียชนิดเม็ด

3. Progression Granulation Stage เป็นระยะที่มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 3 - 5 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดและปริมาณของแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังหมัก และเป็นช่วงที่ระบบมีความสามารถรับการเพิ่มของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงและรวดเร็วขึ้นกว่าระยะอื่นๆ

การเกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดจะเริ่มจากนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนจำกัดในระยะแรก ซึ่งนิวเคลียสเหล่านี้ประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเฉื่อยทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะ (supporting material) ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้นจึงไม่หลุดออกไปจากถังหมัก เมื่อมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกมาจากเมือกหรือกลุ่มตะกอน เนื่องจากถูกรบกวนก็จะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสชุดที่สอง (secondary nuclei) ในการเจริญของตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดต่อไป ซึ่งนิวเคลียสชุดที่สองนี้จะเจริญและสร้างนิวเคลียสชุดที่สามในทำนองเดียวกันนี้ต่อไป ตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดที่เกิดขึ้นในระยะแรกจะประกอบด้วยกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่จับตัวกันหลวมๆ และจะค่อยๆ อัดตัวแน่นเข้า เนื่องจากการเจริญมิได้จำกัดอยู่แต่เฉพาะที่ผิวนอกของกลุ่มตะกอนเท่านั้น แต่ยังเกิดการเจริญภายในด้วย (Lettinga and Hulshoff, 1991)

ลักษณะโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิวสัมผัส และกิจกรรมของตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ (Kosaric and Blaszczyk, 1990)

1) อุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่าง

ควรจะรักษาไว้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนคือ อุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 32 - 50 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างควรอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5

2) องค์ประกอบของน้ำเสีย

น้ำเสียควรจะเป็นของเสียที่ละลายน้ำได้ (soluble waste) และมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์จำเพาะ (specific loading rate) ประมาณ 1 กิโลกรัมซีโอดี (กิโลกรัมวีเอสเอส)$^{-1}$ วัน$^{-1}$ ความเข้มข้นของแร่ธาตุต่างๆ จะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวสัมผัสของตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด เช่นในน้ำเสียที่มีปริมาณแคลเซียมสูงตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดจะเปลี่ยนสีจากสีดำไปเป็นสีเทาหรือแม้กระทั่งสีขาว (Orphan, Kosaric, and Blaszczyk, 1989)

3) ภาวะทางอุทกจลนพลศาสตร์ภายในถังหมัก (Hydrodynamic Conditions)

ภาวะทางอุทกจลนพลศาสตร์มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย โดยที่อัตราการไหลของของเหลวต่ำ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำๆ ในระบบที่ป้อนสารอินทรีย์แบบต่อเนื่อง จะมีผลทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียขาดแคลนอาหารและจะเกิดการย่อยสลายเซลล์แบคทีเรียภายในเม็ดตะกอนแบคทีเรียซึ่งอาจจะทำให้เกิดรูกลวง (hallowing) ภายในเม็ดตะกอนแบคทีเรียโดยจะมีผลทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียมีความหนาแน่นน้อยลง ซึ่งจะทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียลอยขึ้นและหลุดออกจากระบบได้ง่าย (Kosaric, Blaszczyk, 1990) แต่ที่อัตราการไหลของของเหลวสูงๆ ตะกอนอาจจะถูกทำให้แตกสลายและหลุดออกจากถังหมักในรูปของตะกอนเบา

1.4.1 <u>ปัจจัยที่ส่งเสริมกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด</u>

1. ตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้น (seed sludge)

โดยหลักการแล้วตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นสามารถนำมาได้จากมูลสัตว์เคี้ยวเอื้อง ตะกอนโคลนแม่น้ำ (น้ำจืด) ตะกอนจากบ่อเกรอะ ตะกอนแบคทีเรียจากระบบบำบัดน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการหมักแล้ว (digested sludge) และตะกอนแบคทีเรียส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียอื่นๆ ซึ่งตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นควรมีคุณสมบัติดังนี้

ก. การมีแกนหรือตัวพา (carrier material) ที่เหมาะสมเพื่อให้แบคทีเรียเกาะ ซึ่งจำเป็นมากในตอนเริ่มต้นและช่วยกระตุ้นให้เกิดการรวมกลุ่มของแบคทีเรียอีกด้วย

ข. ตะกอนแบคทีเรียที่หนาแน่นมีความเหมาะสมกว่าแบบเจือจาง ซึ่งถึงแม้จะมีจำนวนแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำกว่าในการใช้เริ่มต้นเดินระบบก็ตาม เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียประเภทนี้สามารถถูกกักเก็บไว้ได้นานกว่าตะกอนแบคทีเรียประเภทหนาแน่นน้อยซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างตะกอนออกจากระบบอย่างรวดเร็ว

ค. การเติมตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดลงไปเล็กน้อยในตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นที่ใส่เข้าไปในระบบเพื่อที่จะช่วยให้เกิดกระบวนการสร้างตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดได้เร็วขึ้น

2. ลักษณะการทำงานของระบบในการบำบัดน้ำเสีย

ควรจะมีการทำให้ตะกอนแบคทีเรียที่เบาหลุดออกจากถังหมักอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาตะกอนส่วนที่หนักเอาไว้และเพื่อช่วยให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียใหม่ในส่วนของแบคทีเรียที่เหลืออยู่ในถังหมักอีกด้วย ซึ่งมีข้อแนะนำดังต่อไปนี้

ก. ไม่ควรนำเอาตะกอนแบคทีเรียที่เบาซึ่งหลุดออกจากถังหมักไปแล้วกลับมาใช้ใหม่

ข. นำน้ำเสียที่ผ่านออกจากระบบแล้วกลับมารีไซเคิลหรือใช้ในการเจือจางน้ำเสียที่จะป้อนเข้าสู่ระบบที่มีค่า COD สูงกว่า 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร

ค. เพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นไปเรื่อยๆ ซึ่งมักจะทำหลังจากที่สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ (COD reduction) ได้อย่างน้อย 80%

ง. รักษาความเข้มข้นของอะซิเตตให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

จ. เริ่มต้นเดินระบบด้วยชั้นตะกอนบางคือ 12 - 15 กิโลกรัมวีเอสเอส/ลูกบาศก์เมตร หรือต่ำกว่า 40 กิโลกรัมวีเอสเอส/ลูกบาศก์เมตร

3. องค์ประกอบของน้ำเสีย

องค์ประกอบของน้ำเสียที่จะเข้าไปบำบัดในระบบบำบัดแบบยูเอเอสบีมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด จากการวิจัยพบว่าในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำกว่าจะเกิดแบคทีเรียชนิดเม็ดได้เร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของน้ำเสียไม่ควรต่ำเกินไปควรมีปริมาณสารอินทรีย์ที่พอเหมาะสำหรับการเจริญของแบคทีเรีย ซึ่งระดับค่า COD ไม่ควรต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในน้ำเสียที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำจะทำให้เกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดได้เร็ว นอกจากนี้ในน้ำเสียที่มีกรดไขมันระเหยเป็นองค์ประกอบ น้ำเสียจากโรงงานผลิตยีสต์ โรงงานน้ำตาลที่ผลิตจาก sugar beet และโรงงานแป้งมันสำปะหลังก็สามารถทำให้เกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดได้ดี สำหรับน้ำเสียที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนอาจจะก่อปัญหาบ้างในการนำมาบำบัด เนื่องจากปัญหาการเกิดฟองและการตกตะกอนของโปรตีนในภาวะที่ถังหมักมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงเกินไปหรือในภาวะที่ถังหมักมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ (ค่าความเป็นกรด-ด่าง < 6) แต่ปัญหาที่สำคัญคือการปลดปล่อยสารแอมโมเนียออกมาในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีน ซึ่งจะส่งผลให้น้ำเสียประเภทนี้ไม่สามารถป้อนเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีในอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงๆ ได้ เนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนประมาณ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร จะยับยั้งการรวมกลุ่มกันและการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด รวมทั้งเกิดการยับยั้งการ

เจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน และทำให้เกิดตะกอนลอยได้ (bulky sludge) (Hulshoff, de Zeeuw, Velzeboer, and Lettinga, 1982)

น้ำเสียกลุ่มที่ก่อปัญหาในส่วนของกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด คือ น้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กปะปนอยู่สูง เนื่องจากตะกอนแขวนลอยเหล่านี้จะเข้าไปขัดขวางกลไกการสร้างแบคทีเรียลักษณะเม็ด

4. สารอาหารและธาตุประจุ

ธาตุอาหารเสริมหลักที่มีความจำเป็นสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี ประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสเฟต และซัลเฟอร์ รวมถึงธาตุอาหารเสริมรองอื่นๆ เช่น เหล็ก นิเกิล โคบอลท์ จะต้องมีปริมาณพอเพียงและอยู่ในรูปที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สำหรับสัดส่วนของสารอินทรีย์ต่อไนโตรเจนและสารอินทรีย์ต่อฟอสเฟตในน้ำเสียต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 70 และ 350 ตามลำดับ อนึ่งในกรณีของธาตุอาหารเสริมรองพบว่า ถ้าน้ำเสียมีปริมาณเหล็ก 5 μM นิเกิล 0.25 μM และโคบอลท์ 0.10 μM จะมีส่วนส่งเสริมให้การเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วอย่างมีนัยสำคัญ

สารกลุ่มธาตุประจุซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่างกลุ่มประจุลบบนผิวเซลล์มีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด (Kosaric and Blaszczyk, 1990) การรวมกลุ่มกันของตะกอนแบคทีเรียจะถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} Al^{3+} Ba^{2+} Mg^{2+} Ca^{2+} ซึ่งแนวโน้มของการเพิ่มกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดนี้จะสัมพันธ์กับการลดลงของประจุลบบนผิวเซลล์ พบว่าสารกลุ่ม divalent cations เช่น Ca^{2+} ปริมาณ 40 - 100 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีส่วนส่งเสริมให้แบคทีเรียมีคุณสมบัติในการตกตะกอนและการสร้างแบคทีเรียลักษณะเม็ดดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันถ้าความเข้มข้นสูงมากกว่า 400 มิลลิกรัม/ลิตร จะสร้างปัญหาการเกิดการสะสมตัวของคราบหินปูนในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และในระบบ รวมถึงการขัดขวางกระบวนการสร้างแบคทีเรียลักษณะเม็ด ส่วน divalent cations ที่ส่งเสริมการเกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่เร็วที่สุดคือ แบเรียม (Ba^{2+}) ในขณะที่อะลูมิเนียม (trivalent cation) จะมีผลทำให้เกิดการตกตะกอนเร็วที่สุด (Kosaric, Mahoney, Varangu, and Cairns, 1987) สำหรับกลุ่ม monovalent cations ซึ่งมีสารหลักคือ Na^{+} และ NH_4^{+} โดยธาตุทั้งสองจะมีผลต่อลักษณะสมบัติในการตกตะกอนของแบคทีเรีย โดยที่ Na^{+} ความเข้มข้นต่ำจะเป็นธาตุที่มีความจำเป็นสำหรับการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 350 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ในขณะเดียวกันถ้าความเข้มข้นสูงจะมีผลยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าว สำหรับในกรณีของ NH_4^{+} จะมีส่วนช่วยทำให้เพิ่มประจุทางไฟฟ้าของเซลล์

แบคทีเรีย ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด (Hulshoff *et al.*, 1982) แต่ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีผลขัดขวางการสร้างแบคทีเรียลักษณะเม็ด อิออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงจะมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของเม็ดตะกอนแบคทีเรียมากกว่าอิออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำกว่า ซึ่งจะมีผลไปเพิ่มอัตราการตกตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด (Hubbe, 1981)

5. อุณหภูมิ

แบคทีเรียที่สำคัญในการควบคุมให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญและการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดมี 2 ช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic) ที่อุณหภูมิ 30 - 35 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิสูง (thermophilic) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิในช่วง thermophilic จะช่วยให้กระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดเกิดได้เร็วกว่า โดยที่ลักษณะกลไกของกระบวนการทั้ง 2 มีความแตกต่างกันน้อยมาก

6. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีค่าประมาณ 7.0 และช่วงที่ยังไม่เป็นอันตรายจะอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5

7. อัตราการป้อนสารอินทรีย์

ตะกอนลักษณะเม็ดจะเริ่มปรากฏเมื่อถังหมักยูเอเอสบีมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์มากกว่า 0.6 กิโลกรัมซีโอดี/กิโลกรัมวีเอสเอส/วัน ส่วนการเดินระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำกว่านี้เป็นระยะเวลานาน จะมีผลทำให้ลักษณะสมบัติในการตกตะกอนของแบคทีเรียเลวลงและก่อให้เกิดปัญหาตะกอนแบคทีเรียลอยตัว ซึ่งจะถูกชะล้างออกจากถังหมักในที่สุด

8. สารที่ก่อความเป็นพิษ

สภาพความเป็นพิษที่เกิดกับแบคทีเรียในถังหมักยูเอเอสบีมีสาเหตุส่วนใหญ่มาจากสารกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ ซัลเฟต ซัลไฟด์ คลอโรฟอร์ม ไซยาไนด์ ฟีนอล คลอไรด์ ไนเตรตและออกซิเจน ซึ่งสารเหล่านี้จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้ปนเปื้อนในน้ำเสียในปริมาณความเข้มข้นที่สูงจนก่อให้เกิดความเป็นพิษ สำหรับกรณีที่ไม่สามารถกำจัดสารเหล่านี้ออกจากน้ำเสียได้ การลดความเป็นพิษของสารเหล่านี้ก็สามารถกระทำได้โดยการเจือจางน้ำเสีย การหมุนเวียนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าระบบ การนำน้ำเสียที่มีสารพิษนี้ผสมกับน้ำเสียประเภทอื่นๆ และ pre - acidification สำหรับในกรณีของซัลเฟตพบว่าในปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่แตกตัวและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียสูงมาก ดังนั้น

การควบคุมให้ค่าสัดส่วนของสารอินทรีย์ต่อซัลเฟต (COD : SO_4^{2-}) ให้สูงมากกว่า 10 กรัม/กรัม เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย กลิ่นเหม็นและการกัดกร่อน

9. การกวนผสม

ในถังปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ การผสมผสานระหว่างตะกอนแบคทีเรียและน้ำเสียอย่างทั่วถึงเป็นปัจจัยสำคัญในการก่อให้เกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นในกรณีของถังหมักแบบยูเอเอสบี การกวนยังเป็นการลดปัญหาการลัดวงจร (shot circuit) และการเกิด channeling ในส่วนของตะกอนชั้นล่าง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง แต่ในขณะเดียวกันการกวนอย่างรุนแรงและต่อเนื่องก็จะมีผลไปทำลายตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด ดังนั้นในกรณีนี้ควรมีการใช้เครื่องกวนในช่วงเริ่มต้นเดินระบบเนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ยังมีปริมาณน้อยไม่พอเพียงในการทำหน้าที่กวนส่วนของตะกอนชั้นล่าง การกวนควรจะทำเป็นช่วงๆ การกวนนอกจากใช้เครื่องกวนจักรกลแล้ว อาจจะใช้วิธีการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ การเพิ่มการรีไซเคิลน้ำที่บำบัดแล้วกลับเข้ามาในระบบ และการหมุนเวียนก๊าซกลับเข้าระบบ

1.4.2 <u>แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด</u>

จุลินทรีย์หลายชนิดมีแนวโน้มที่จะยึดเกาะตัวของมันเองกับพื้นผิวต่างๆ หรือกับจุลินทรีย์ด้วยกันเอง (Robinson, 1986) ปัจจัยต่างๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อมจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านสรีรวิทยาของแบคทีเรียทำให้แบคทีเรียที่กระจัดกระจายอยู่เกิดการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนแบคทีเรีย การรวมตัวกันของแบคทีเรียเป็นตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดมีข้อดีเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเชื้อแบคทีเรียที่รวมกันเป็นตะกอนเม็ด ซึ่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้แก่ ภาวะเกื้อกูล (commensalism) ภาวะพึ่งพา (mutualism) ภาวะมีปรสิต (parasitism) และการแลกเปลี่ยนสารพันธุกรรม (Kosaric and Blaszczyk, 1990)

Methanothrix และ *Methanosarcina* (*Methanococcus*) เป็นเชื้อแบคทีเรียที่สำคัญในการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด (van den Berg, 1984) โดยที่ *Methanosarcina* สามารถที่จะรวมกลุ่มกันได้แต่ไม่สามารถที่จะยึดเกาะกับพื้นผิวต่างๆ ได้ง่าย ส่วน *Methanothrix* สามารถที่จะยึดเกาะกับพื้นผิวที่เฉื่อย (inert surface) และจะทำหน้าที่เป็นตัวตั้งต้นในการเกิดเม็ดตะกอนแบคทีเรีย (aggregate precursor) ภายใต้ภาวะของระบบที่มีอะซิเตตความเข้มข้นต่ำ (Basu and Leclerc, 1975) และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์อย่างระมัดระวังเป็นขั้นตอน *Methanothrix*

จะเติบโตมีรูปร่างเป็นแท่ง (rod) และจะก่อรูปเป็นตะกอนที่อัดแน่นในที่สุด ซึ่งจะไปยึดเกาะกับพื้นผิวเพื่อที่จะสร้างเม็ดตะกอนแบคทีเรียต่อไป

กลุ่มเซลล์ของ *Methanosarcina* ที่อยู่ในภาวะที่มีอะซิเตตความเข้มข้นสูงจะก่อรูปขึ้นเป็นตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดโดยมี *Methanothrix* อยู่ตรงกลางภายใน ซึ่งทฤษฎีนี้สามารถยืนยันได้โดยจากการสังเกตซึ่งพบว่าเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่สร้างขึ้นมาใหม่จะมี *Methanothrix* อยู่ตรงกลาง และล้อมรอบด้วย *Methanosarcina* ซึ่งอยู่ด้านนอก เมื่อเม็ดตะกอนแบคทีเรียมีอายุมากขึ้นจะประกอบด้วย *Methanothrix* ซึ่งอัดตัวกันอย่างแน่นหนา แต่ *Methanosarcina* ที่อยู่ด้านนอกจะหายไป (de Zeeuw, 1987)

ทฤษฎีทั้งสองดังกล่าวข้างต้นได้พิสูจน์ให้เห็นว่าเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่อัดตัวกันอย่างแน่นหนาและมีอายุมากจะประกอบด้วย *Methanothrix* เป็นส่วนมาก

แบคทีเรียชนิดอื่นที่สามารถพบได้ในตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดนอกเหนือจาก *Methanothrix* และ *Methanosarcina* แล้วยังมี *Desulfovibrio Propionibacterium Syntrophobacter Methanobrevibacterium* และ *Pelobacter* อีกด้วย (Dubourguier, Prensier, and Albagnac, 1987)

ความแตกต่างของสีของเม็ดตะกอนแบคทีเรียสามารถบอกถึงสัญญาณเบื้องต้นเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย โดยทั่วๆ ไปเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำจะแข็งแรงกว่าเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีเทา และเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีเทาจะแข็งแรงกว่าเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีขาว เม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำจะมีผิวเรียบและมีรูปร่างกลมหรือค่อนข้างกลม แบคทีเรียที่พบส่วนมากเป็นแบคทีเรียชนิดที่เป็นเส้นสาย (filamentous bacteria) หรือรูปท่อนโค้ง (short curved rods) เม็ดตะกอนแบคทีเรียสีเทาจะมีพื้นผิวที่ไม่เรียบและลักษณะสัมผัสหยาบมากกว่าเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำ ส่วนเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีขาวจะมีพื้นผิวขรุขระมากที่สุดและจะมีรอยแยกที่พื้นผิวซึ่งจะทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียนี้แตกสลายได้ง่าย การวิเคราะห์ทางเอ็กเรย์ (X-ray Analysis) แสดงให้เห็นพื้นที่ 4 บริเวณของเม็ดตะกอนแบคทีเรียซึ่งได้แก่บริเวณผิวนอก เส้นรอบวง บริเวณกึ่งกลางรัศมี และบริเวณแกนกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำจะประกอบด้วยซิลิกอนและอะลูมิเนียมในปริมาณสูงตลอดทั้งเม็ดตะกอนแบคทีเรีย ส่วนเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีเทาจะประกอบด้วยซิลิกอนและอะลูมิเนียมในบริเวณแกนกลางในปริมาณเท่าๆ กันกับในเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำ แต่ความเข้มข้นของธาตุทั้งสองจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงบริเวณผิวนอก และเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีขาวจะประกอบด้วยซิลิกอนและอะลูมิเนียมในปริมาณที่น้อยมาก ธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำ เทา และขาว ทั้ง 4 บริเวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.9

ตารางที่ 1.9 สัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุต่างๆ ในพื้นที่ 4 บริเวณของเม็ดตะกอนแบคทีเรียสีดำ เทาและขาว ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดย EDAX Analysis (Orphan, Kosaric, and Blaszczyk, 1989)

Color	Element	Surface	Periphery	$^{1}/_{2}$ Radius	Core
A. Black	Ca	19.76	13.26	19.44	1.83
	Fe	7.95	5.59	7.40	5.75
	Cu	1.75	3.16	2.67	2.81
	S	14.13	19.06	18.53	15.47
	P	19.66	21.45	15.47	15.62
	Si	14.22	13.63	14.08	16.48
	Al	19.62	18.42	19.94	20.61
	K	0.58	1.18	0.58	0.73
	Na	1.57	3.70	1.07	0.48
	Cl	0.76	0.55	0.70	0.22
B. Gray	Ca	18.72	15.31	17.49	18.24
	Fe	6.22	8.04	7.62	5.69
	Cu	4.31	9.06	3.58	3.78
	S	34.87	28.62	18.87	17.47
	P	27.22	19.51	15.90	16.60
	Si	2.39	3.84	13.91	15.35
	Al	1.55	3.80	18.58	19.05
	K	3.56	4.90	2.16	2.56
	Na	0.11	4.70	1.30	0.66
	Cl	1.01	2.22	0.60	0.32
C. White	Ca	12.18	18.39	14.98	n/a
	Fe	3.86	4.60	4.49	n/a
	Cu	6.17	7.97	8.64	n/a
	S	31.17	26.18	35.17	n/a
	P	23.87	23.93	23.39	n/a
	Si	1.89	3.81	1.43	n/a
	Al	1.05	1.07	0.00	n/a
	K	10.94	6.53	6.36	n/a
	Na	7.30	5.12	2.85	n/a
	Cl	1.58	2.42	2.67	n/a

1.5 การเริ่มต้นเดินระบบ (Start - up) (สมชาย ดารารัตน์, 2536)

การเริ่มต้นเดินระบบของถังหมักแบบยูเอเอสบีเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อความสำเร็จในการเดินระบบและเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาค่อนข้างมาก รวมถึงเป็นขั้นตอนที่มีความพิถีพิถันเป็นอย่างมาก การเริ่มต้นเดินระบบจะเป็นขั้นตอนที่เริ่มตั้งแต่การเติมตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นเข้าสู่ระบบจนถึงช่วงที่ตะกอนแบคทีเรียพัฒนาลักษณะสมบัติในการตกตะกอนให้ดีขึ้น หรือจนมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบคทีเรียลักษณะเม็ด ซึ่งสามารถจำแนกเป็น 3 ขั้นตอนตามการพัฒนาของแบคทีเรียดังนี้

- การปรับตัวและการเจริญของแบคทีเรียที่ย่อยสลายอะซิเตตและโพรพิโอเนต
- การพัฒนาและเพิ่มจำนวนแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูง
- การพัฒนาและเพิ่มจำนวนแบคทีเรียลักษณะเม็ด

ปัจจัยที่มีผลต่อขั้นตอนการเริ่มต้นเดินระบบสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ปริมาณตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้น

ปริมาณตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นที่เติมเข้าระบบจะต้องมีปริมาณไม่มากจนก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างของตะกอนแบคทีเรียเนื่องจากการยกตัวของตะกอนชั้นล่าง และก็ไม่น้อยจนไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปริมาณตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นจะอยู่ในช่วง 12 - 15 กิโลกรัมวีเอสเอส/ลูกบาศก์เมตร ในกรณีตะกอนที่ผ่านการหมักประเภทความหนาแน่นสูง และ 6 กิโลกรัมวีเอสเอส/ลูกบาศก์เมตร ในกรณีตะกอนที่ผ่านการหมักประเภทความหนาแน่นน้อย

2. ตะกอนแบคทีเรียชะล้างออกจากระบบ

ตะกอนแบคทีเรียที่ถูกชะล้างออกจากระบบจะต้องไม่นำกลับเข้าถังหมักอีกเป็นอันขาด การชะล้างตะกอนแบคทีเรียออกจากถังหมักเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ

ก. การยกตัวของตะกอนชั้นล่างซึ่งเป็นปัญหาต่อถังหมักมากและจะต้องพยายามให้เกิดการชะล้างตะกอนแบคทีเรียเนื่องจากสาเหตุนี้ให้น้อยที่สุด เนื่องจากในกรณีนี้จะมีผลทำให้ตะกอนแบคทีเรียมีเวลากักเก็บในระบบสั้นและในบางกรณีอาจนำมาซึ่งความล้มเหลวของระบบ

ข. การกัดเซาะของตะกอนชั้นล่าง (sludge bed erosion) การชะล้างประเภทนี้จะเป็นการคัดเลือกตะกอนแบคทีเรียที่มีน้ำหนักมากและมีศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง ซึ่งในที่สุดจะนำมาซึ่งกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด

3. อัตราการป้อนสารอินทรีย์

ในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบ การเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะต้องกระทำเป็นขั้นตอน เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการรบกวนภาวะสมดุลของปริมาณแบคทีเรียภายในระบบ สำหรับหลักการในการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์คือ ประมาณ 80 % จึงจะสามารถเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้ การเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วและไม่มีขั้นตอนจะส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

การเดินระบบในภาวะที่มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงเกินไป (overloading) จะส่งผลเสียต่อกระบวนการเกิดตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด สำหรับเกณฑ์การเริ่มต้นเดินระบบจะเริ่มที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 0.05 - 0.10 กิโลกรัมซีโอดี/กิโลกรัมวีเอสเอส/วัน สำหรับในกรณีของน้ำเสียที่มีสัดส่วนของสารที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้สูง (COD มีค่าสูงแต่ BOD มีค่าต่ำ) อัตราการป้อนสารอินทรีย์เริ่มต้นอาจจะเริ่มที่ 0.7 กิโลกรัมซีโอดี/กิโลกรัมวีเอสเอส/วัน

4. อัตราการป้อนของเหลว

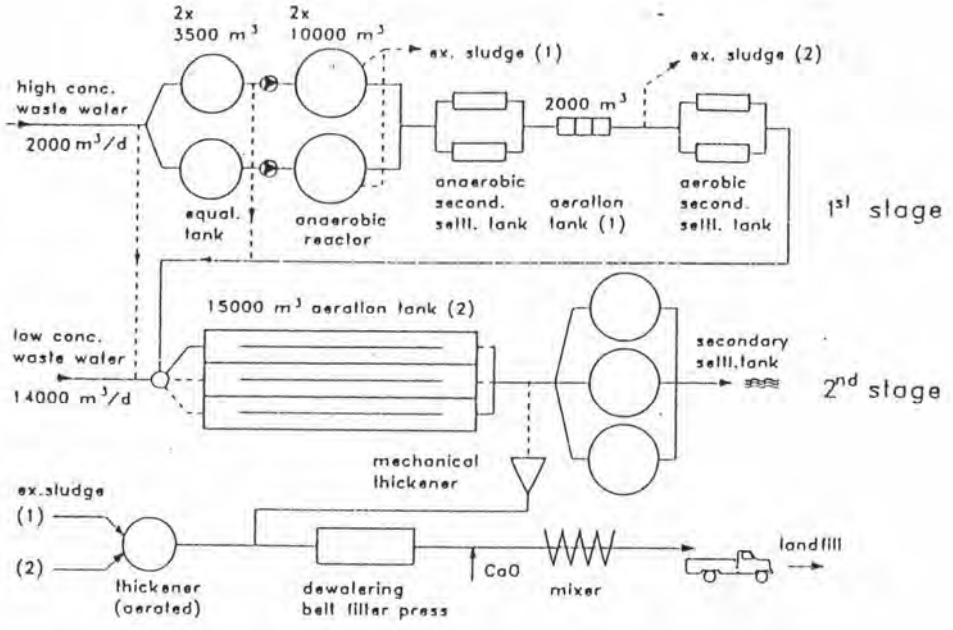
อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียในถังหมักแบบยูเอเอสบี มีบทบาทสำคัญในการคัดเลือกแบคทีเรียที่มีน้ำหนักสูงและการชะล้างตะกอนแบคทีเรียที่มีน้ำหนักเบาซึ่งไม่สามารถพัฒนาไปเป็นตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่สูงมากเกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างตะกอนแบคทีเรียมากจนก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบ ขณะที่อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่ต่ำเกินไปจะมีผลทำให้กระบวนการคัดเลือกแบคทีเรียที่จะเกิดเป็นตะกอนชนิดเม็ดไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เกณฑ์ในการออกแบบการไหลเข้าของน้ำเสียในเทอม surface load มีค่าประมาณ 1.0 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร/วัน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการบำบัดน้ำเสียในกระบวนการผลิตกรดมะนาว

Gonenc และ Keresteciogiu (1990) ได้ทำการทดลองการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกรดมะนาวโดยวิธีแอนแอโรบิกคอนแทคชนิดสองขั้นตอน โดยน้ำเสียส่วนใหญ่ได้มาหลังจากขั้นตอนการกรองตะกอนแคลเซียมซิเตรตออกจากน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียนี้จะมีอุณหภูมิสูง (45 - 60 องศาเซลเซียส) มีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง (COD (avg) = 35,000 มิลลิกรัม/ลิตร BOD (avg) = 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร) มีสภาพเป็นกรด (ค่าความเป็นกรด-ด่าง = 5.5 - 7.0) และมีซัลเฟต

(SO_4^{2-} = 1,300 มิลลิกรัม/ลิตร) แคลเซียม (Ca^{2+} = 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร) และไนโตรเจน (TKN (avg) = 1,800 มิลลิกรัม/ลิตร) และหลังจากนั้นจะนำไปบำบัดต่อโดยวิธีการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งระบบนี้จะประกอบด้วยถังหมักและถังตกตะกอน เชื้อจุลินทรีย์ภายในถังหมักจะถูกทำให้เป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และตะกอนจุลินทรีย์จะอยู่ในสภาพแขวนลอยโดยการกวนด้วยวิธีทางเครื่องกลและการกวนโดยใช้ก๊าซหมุนเวียน ในถังตกตะกอนจะเกิดการแยกชั้นระหว่างตะกอนจุลินทรีย์กับน้ำเสีย โดยที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นถังจะถูกสูบกลับไปยังถังปฏิกิริยา ส่วนตะกอนส่วนเกินก็จะถูกกำจัดออกไปจากระบบ การแยกออกเป็นสองขั้นตอนและการควบคุมทางจลนพลศาสตร์ถูกนำมาใช้เพื่อออกแบบระบบ ซึ่งจากเทคนิคนี้กระบวนการไฮโดรไลซิส กระบวนการสร้างกรดและกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน สามารถควบคุมทางจลนพลศาสตร์ได้โดยการควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียและการรีไซเคิลตะกอนแบคทีเรียในถังหมักแต่ละถัง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและผลผลิตสุดท้ายของมันจะมีผลต่อการทำงานของระบบทำให้การทำงานของระบบไม่คงที่และอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง และพบว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ อัตราการป้อนของเหลว สัมประสิทธิ์ของผลผลิต และความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากในการออกแบบระบบและการดำเนินงานของระบบแอนแอโรบิกคอนแทค นอกจากนั้นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน (solid - liquid separation equipment) ก็เป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากของระบบนี้

Svardal และคณะ (1993) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกรดมะนาวเพื่อให้ได้น้ำเสียที่บำบัดแล้วมีคุณภาพสูงสุด โดยใช้การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนในขั้นต้นก่อนแล้วจึงทำการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนในขั้นตอนต่อไป กรดมะนาวนี้ผลิตขึ้นมาจากกากน้ำตาลของหัวบีท (beet sugar molasses) น้ำเสียนี้จะมีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส และมีปริมาณสารอินทรีย์เข้มข้นสูงมาก คืออยู่ในช่วง 20 ถึง 40 กรัม/ลิตร ถังหมักที่ใช้เป็นแบบ EKJ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 เมตร สูง 11 เมตร และมีปริมาตรการใช้งานอยู่ในช่วง 10,000 ลูกบาศก์เมตร และออกแบบมาเพื่อสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้ 60 ตัน/วัน หรืออัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.0 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน แผนผังของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกรดมะนาวดังแสดงในรูปที่ 2.4 อุณหภูมิภายในถังหมักมีเทนอยู่ในช่วง 36 - 38 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบนี้ประกอบด้วยการทำงาน 4 ขั้นตอน โดยมีกระบวนการทางด้านจุลชีววิทยาที่แตกต่างกัน กล่าวคือ



รูปที่ 1.4 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกรดมะนาว (Svardal *et al.*, 1993)

ก. กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์และการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นในถังปรับสภาพ (equalizing tank) และถังหมักกรด

ข. ถังหมักมีเทน

ค. ระบบตะกอนเร่งในขั้นต้น ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น - ดีไนตริฟิเคชั่น ของน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงๆ

ง. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีใช้อากาศในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งจะรวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น - ดีไนตริฟิเคชั่น ซึ่งระบบนี้จะมีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของระบบและประสิทธิภาพของระบบให้คงที่ โดยมีค่า แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_4-N) และไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2-N) ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดมากกว่า 80 % และการกำจัด BOD_5 มากกว่า 99 %

Janosz (1993) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตกรดมะนาวจากกากน้ำตาลในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักแบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Upflow Biofilter) โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 36 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่ได้นี้มาจากขั้นตอนการแยกตะกอนแคลเซียมซิเตรตออกจากน้ำหมัก เตรียมน้ำเสียโดยการเจือจางด้วยน้ำประปา

และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 7.0 - 7.5 โดยน้ำเสียที่ได้นี้จะมีค่า COD เท่ากับ 6,800 - 9,100 มิลลิกรัม/ลิตร และมี BOD_5 เท่ากับ 3,620 - 4,810 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 112 - 3,052 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน 14-181 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณฟอสเฟตจะอยู่ในช่วงระหว่าง 42 - 170 มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณซัลเฟตเท่ากับ 140 - 190 มิลลิกรัม/ลิตร การบำบัดน้ำเสียนี้มีประสิทธิภาพสูง กล่าวคือมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ BOD_5 เท่ากับ 73 % และ 73 % ตามลำดับ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 3.16 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งมีระยะเวลากักเก็บน้ำเสียในระบบเท่ากับ 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.32 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด

Germirli และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาผลของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนชนิดสองขั้นตอน โดยน้ำเสียที่ได้มาจากกระบวนการผลิตกรดมะนาวจากการหมักกากน้ำตาล (sugar-beet molasses) ซึ่งมีค่า COD ที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 29,265 มิลลิกรัม/ลิตร และ COD ทั้งหมดเท่ากับ 31,030 มิลลิกรัม/ลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอย 1,695 มิลลิกรัม/ลิตร ของแข็งแขวนลอยระเหยเท่ากับ 1,515 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.1 ปริมาณไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 555 มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 700 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งน้ำเสียนี้จะถูกป้อนเข้าไปในถังหมักกรดที่มีขนาด 700 ลูกบาศก์เมตร ด้วยอัตราการไหล 350 ลูกบาศก์เมตร/วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.0 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน น้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดจะถูกป้อนเข้าไปในถังหมักมีเทนซึ่งมีปริมาตร 2,100 ลูกบาศก์เมตร แล้วน้ำเสียที่ออกจากถังหมักมีเทนจะเข้าไปในเครื่องแยกตะกอนแบบเพลท ซึ่งจะทำการรีไซเคิลตะกอนแบคทีเรียด้วยอัตรา 25 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ซึ่งพบว่าในถังหมักกรดมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 41.43 % ส่วนในถังหมักมีเทนมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ 40.35 %

1.7 มูลเหตุจูงใจในการทำงานวิจัย

เนื่องจากทางสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตกรดมะนาวมาอย่างต่อเนื่องจนถึงขั้นตอนการผลิตในระดับขยายส่วน ซึ่งจากกระบวนการผลิตกรดมะนาวนี้จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมาก และน้ำเสียเหล่านี้จะมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูงมาก ถ้าปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นเสียก่อนก็จะมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการเสริมขั้นตอนต่อเนื่องในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตกรดมะนาวให้ครบวงจรต่อไป จึงมีแนวความคิดที่จะบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการหมักกรดมะนาวนี้โดยวิธีการทางชีวภาพด้วยวิธีบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ลงได้อย่างมาก และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ

1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาว รวมทั้งใช้ระบบบำบัดยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ในระดับห้องทดลอง ตลอดจนแสวงหาและทดสอบภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดด้วย ซึ่งข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและดำเนินงานในระดับขยายส่วนต่อไป

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. วิเคราะห์หาองค์ประกอบและสมบัติจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาว

2. ใช้ระบบบำบัดยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียนี้ในระดับห้องทดลอง

3. แสวงหาและทดสอบภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว

4. ประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบ เพื่อหาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสม