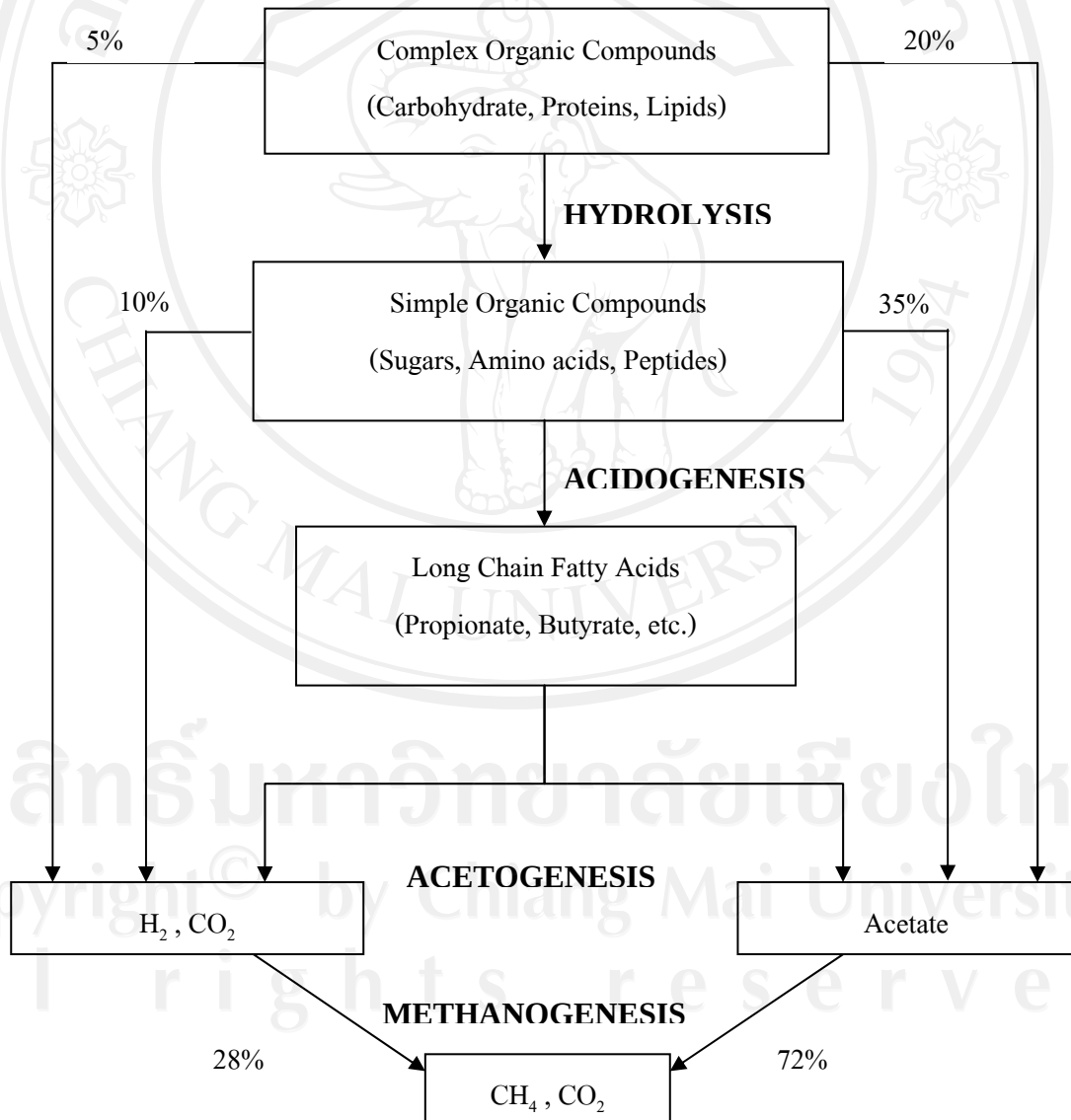


บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

หลักการของระบบแบบไร้อากาศ คือ ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีโมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อยๆ โดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมี (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542) (รูป 2.1) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูป 2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ
ที่มา: (McCarty and Smith, 1986)

2.1.1 ไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

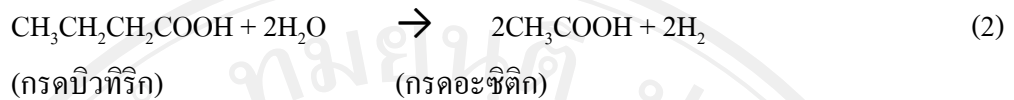
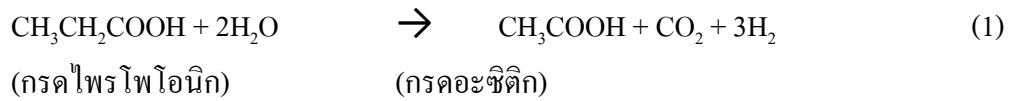
ไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัย เอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายดังกล่าว

2.1.2 การสร้างกรด (acidogenesis)

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแพร่ซึมเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียสร้างกรดถูกใช้เป็นสารอาหาร(substrate) และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid) เช่น อะซิติก บิวไทริก โพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก ชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารอาหาร และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติก และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ความดัน พาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นบิวไทริก และโพรไพโอนิก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและ คาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิถี Embden – Meyerhof ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำ หากไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง ผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (มันสัน ตันทูลเวสม์, 2542)

2.1.3 อะซิโตเจเนซิส (acetogenesis)

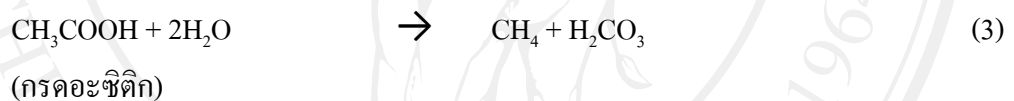
เป็นการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันอื่นๆ แบคทีเรียอะซิโตจิติก (แบคทีเรียสร้าง อะซิติก) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรด และขั้นตอนการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารอาหารที่เฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสารอาหารในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรีย อะซิโตจิติก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 10^{-4} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดโพรไพโอนิก และกรดบิวไทริก ตามลำดับ ดังสมการที่ 1 และ 2 (มันสัน ตันทูลเวสม์, 2542)



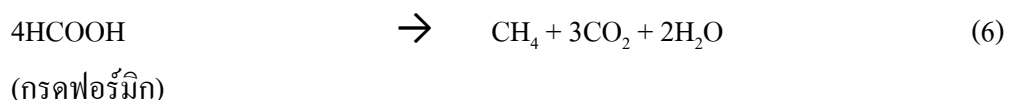
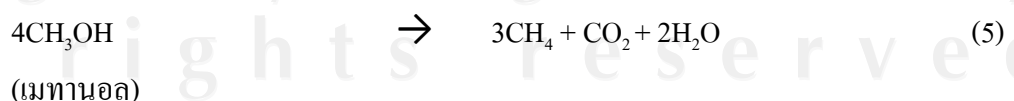
ขั้นตอนที่ 3 นี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำเท่านั้น กรดไขมันไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลสูง

2.1.4 การสร้างมีเทน (methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด ดังสมการที่ 3 และ 4



กรดอินทรีย์ระยะเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรงแบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระยะเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สารอาหารอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก (HCOOH) ดังสมการที่ 5 และ 6 (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)



2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

2.2.1 แบคทีเรียสร้างกรด (acidogenic bacteria)

ในขั้นตอนการสร้างกรดของกระบวนการแบบไร้อากาศ กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียพวก Obligate และ Facultative Anaerobes โดยแบคทีเรียพวกแรกมีจำนวนมากกว่าแบคทีเรีย Obligate Anaerobes ที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือกลุ่ม *Clostridium* แบคทีเรียกลุ่มนี้มี เมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวก Polysaccharides หรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้จึงมีหลายชนิดต่างๆ ไป เช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซิโตน เป็นต้น นอกจากนี้แบคทีเรียในกลุ่ม *Propionibacteria* ที่ผลิตกรดโพรไพโอนิก และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก (Fenchel and Finlay, 1995)

2.2.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (acetogenic bacteria)

เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังกล่าว และบางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ ดังนั้น จึงต้องมีการเปลี่ยนสารอาหารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ซึ่งแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

(1) Homoacetogenic Bacteria

เป็นแบคทีเรียที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา เป็นกระบวนการหายใจแบบไร้อากาศผ่านวิถีที่เรียกว่า Acetyl-CoA Pathway แบคทีเรียชนิดนี้ เช่น *Acetobacteria woodii* และ *Clostridium aceticum* สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบออโทโทรฟิก (autotrophic) คือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก อีกทั้งเจริญเติบโตแบบเฮเทอโรโทรฟิก (heterotrophic) ก็ได้ โดยการหมักน้ำตาล ดังสมการที่ 7 และ 8



จะเห็นว่าแบคทีเรียพวก *Clostridium* มีอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดทั่วไป และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียกลุ่มนี้มีเมตาบอลิซึมหลายแบบ

(2) H_2 – producing Bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือ แอลกอฮอล์ เป็นสารอาหารแล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนขึ้นมา ซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังนั้น แบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ดี แบคทีเรียชนิดนี้จะเจริญเติบโตไม่ดีเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา ถ้าสะสมจะทำให้มีความดันพาร์เซียของก๊าซไฮโดรเจนสูง ทำให้ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกนี้ลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทน ให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน และต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็จะช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

แบคทีเรียชนิดนี้จะอยู่ในกลุ่ม *Syntrophomonas* และกลุ่ม *Syntrophobacter* โดยแบคทีเรีย *Syntrophomonas wolfei* จะช่วยย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 8 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบคทีเรีย *Syntrophomonas wolinii* จะย่อยกรดโพรไพโอนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

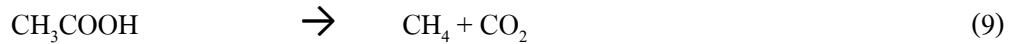
2.2.3 แบคทีเรียสร้างมีเทน (methanogenic bacteria)

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศชนิดเค็ดขาด ไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดออกโทโทรป ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นสารอาหารของแบคทีเรียกลุ่มนี้เพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น ดังตาราง 2.1

สารอาหารชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ ไม่ว่าจะเป็นกรดอินทรีย์ระเหย เช่น บิวไทริก หรือโพรไพโอนิก ซึ่งปกติเป็นสารอาหารของแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟต แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้

แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของสารอาหารที่ใช้ได้แก่

(1) Obligate Acetoclastic Methanogen เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ตามสมการที่ 9



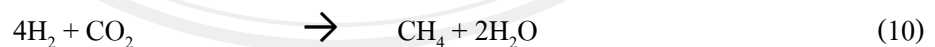
ตาราง 2.1 สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้

ที่มา: (Madigan and other, 1997)

กลุ่มสารอาหาร	สารอาหาร
CO₂ – type substrates	- Carbon dioxide (with electrons derived from H₂) - Formate, HCOO - Carbon Monoxide, CO
Methyl substrates	- Methanol, CH₃OH - Methylamine, CH₃NH⁺ - Dimethylamine, (CH₃)₂NH₂⁺ - Trimethylamine, (CH₃)₃NH⁺ - Methylmercaptan, CH₃SH - Dimethylsulfide, (CH₃)₂S
Acetotrophic substrate	- Acetate, CH₃COO⁻

(2) Obligate Hydrogenotrophic Methanogen (hydrogen utilizer) เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน ในการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการที่

10



นอกจากก๊าซไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นแหล่งอาหารเพียงอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

(3) Hydrogenotrophic / Acetoclastic Methanogen เป็นแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติก หรือก๊าซไฮโดรเจน แต่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้ดีกว่า

2.2.4 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (sulfate reducing bacteria)

สิ่งมีชีวิตหลายชนิดในธรรมชาติทั่วไปไม่ว่าจะเป็นพืชชั้นสูง สัตว์ ร่า และเซลล์ของพวกโปรคาริโอตหลายชนิดสามารถใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟอร์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์

แต่ความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจำกัดอยู่แต่ในแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Desulfovibrio ก่อนข้างจะทนต่อออกซิเจนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนสามารถรีดิวซ์ไนเตรตเป็นแอมโมเนียได้ด้วย) จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรปดำรงชีพและเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการรีดิวซ์ซัลเฟตทำให้ซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนโมเลกุลหรือสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในกรณีที่สารให้อิเล็กตรอนคือไฮโดรเจนโมเลกุลหรืออะซิเตต ขั้นตอนดังกล่าวนี้จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนตามปกติ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตจึงมักพบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนเสมอ

2.3 ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย

2.3.1. อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีอยู่ 2 ช่วง คือ

- (1) ช่วง 28 - 38 °C เรียกว่า เมโซฟิลิก (mesophilic)
- (2) ช่วง 50 - 65 °C เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (thermophilic)

ตามปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้นอัตราการเจริญเติบโตก็จะเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถ้าสูงเกินกว่าที่เซลล์ทำงานได้โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายส่วนจะถูกทำลายจนไม่อาจกลับคืนสภาพได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเพิ่มการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว

2.3.2. พีเอช

จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชช่วงหนึ่ง ค่าพีเอชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดก็จะอยู่ในช่วงนี้ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5 - 10 เพราะ สภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักมีพีเอชอยู่ในช่วง 5 - 10 จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 เรียกว่า Acidophiles เช่น ราและแบคทีเรียบางชนิด ส่วนพวกที่เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 10 - 11 เรียกว่า Alkaliphiles (McCarty, 1964)

พีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการแบบไร้อากาศควรอยู่ระหว่าง 6.8 - 7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2.3.3. กรดไขมันระเหยและสภาพต่าง

กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียสร้างกรดปกติ ควรมีค่าประมาณ 200 - 400 มก.กรดอะซิติก/ล. กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียสร้างกรด แม้ว่าแบคทีเรียสร้างกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตขึ้นได้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม สังเกตได้จากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า ดังนั้นสภาพต่างจึงแสดงถึงกำลังบัพเพอร์ของระบบซึ่งจะรักษาระบบให้พีเอชค่อนข้างคงที่และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ โดยทั่วไปกระบวนการแบบไม่ใช้อากาศควรมีสภาพต่างประมาณ 1,500 - 2,000 มก./ล. นอกจากจะดูสภาพต่างแล้ว ยังต้องพิจารณาอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อสภาพต่าง (as CaCO_3) โดยค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างน้อยกว่า 0.4 ถือได้ว่าระบบยังทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างสูงกว่า 0.8 แล้ว แสดงว่าระบบมีบัพเพอร์ต่ำ ควรหาสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนสูงขึ้นและแก้ไข เพราะพีเอชมีแนวโน้มลดลงจนระบบอาจล้มเหลวได้

2.3.4. อาหารเสริม

แม้ว่าเซลล์ของแบคทีเรียที่สร้างขึ้นมากในกระบวนการแบบไร้อากาศจะมีน้อยกว่าแบบใช้อากาศแต่จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C : N : P : S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100 : 10 : 1 : 1 จึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่น้อยกว่านี้ จุลินทรีย์จึงต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสควรมีค่า 100 : 1 : 0.2 (McCarty, 1964) สำหรับกระบวนการแบบไร้อากาศ นอกจากนี้ยังมีธาตุบางอย่างที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการเป็นปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้เด็ดขาด ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ และซัลเฟอร์

(1) เหล็กและโคบอลต์

เหล็กเป็นธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้น้อยและสามารถรวมกับซัลไฟด์ในระบบแยกตัวออกจากน้ำตกตะกอนผลึกในรูปเหล็กซัลไฟด์ ทำให้อาจเกิดปัญหาการจำกัดของเหล็กได้ ส่วนโคบอลต์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่า แต่ก็อาจเกิดปัญหาเดียวกันได้

(2) นิกเกิล

นิกเกิลเป็นส่วนประกอบสำคัญของโคเอนไซม์ F_{430} ซึ่งเป็นหนึ่งในโคเอนไซม์สำคัญต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนซึ่งได้แก่ โคเอนไซม์ F_{420} , F_{430} และ 2-mercaptoethane Sulfonic Acid โดยปกติแล้วนิกเกิลเป็นมลทินที่ติดอยู่ใน Yeast Extract และในเกลือแร่อื่นๆ ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนได้รับนิกเกิลโดยไม่ได้ตั้งใจ อย่างไรก็ตามนิกเกิลอาจรวมกับซัลไฟด์และตกผลึกได้เช่นเดียวกับผลึกเหล็ก จึงอาจมีความจำเป็นต้องเติมนิกเกิลบ้างในกรณีที่ไม่มีหรือนิกเกิลไม่เพียงพอ

(3) ซัลไฟด์

บทบาทของซัลไฟด์ที่มีต่อระบบแบบไร้อากาศมีทั้งเชิงบวกและเชิงลบ ซัลไฟด์มีผลเสียต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนเนื่องจากสามารถตกผลึกเหล็ก นิกเกิล และโลหะหนักที่จำเป็นต่างๆ นอกจากนี้ซัลไฟด์ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100 - 150 มก./ล. เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน (มันสิน ตันจุลเทศ, 2536) แต่อย่างไรก็ดี ซัลไฟด์ในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็เป็นสารที่จำเป็นและขาดไม่ได้สำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อวิเคราะห์เซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนปรากฏว่าพบซัลไฟด์สูงถึง 2.6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด ในขณะที่โคเอนไซม์ 2-mercaptoethane sulfonic acid มีซัลไฟด์เพียง 4 เปอร์เซ็นต์ของที่พบทั้งหมด ดังนั้นซัลไฟด์ 2.6 เปอร์เซ็นต์นี้ต้องเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของแบคทีเรีย ความต้องการซัลไฟด์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนอาจแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 1 - 25 มก./ล. ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ในน้ำที่แบคทีเรียนำไปใช้ได้ จะถูกกำหนดโดยพีเอช และความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบรรยากาศเหนือน้ำของถังปฏิกรณ์ (McCarty, 1964)

2.3.5. สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบแบบไร้อากาศโดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีอยู่หลายชนิดระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้

(1) พิษของอามโมเนีย

อามโมเนียในน้ำเสียที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ได้แก่ โซเดียมอามโมเนีย, โพแทสเซียมอามโมเนีย, แมกนีเซียมอามโมเนีย และแคลเซียมอามโมเนีย อามโมเนียถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะเริ่มเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยเฉพาะอามโมเนียที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอามโมเนียที่มีวาเลนซ์ต่ำๆ ซึ่งพิษจากอามโมเนียของแมกนีเซียมและแคลเซียมมีมากกว่าโซเดียมและโพแทสเซียมถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของอามโมเนียจึงเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซ์สูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของอามโมเนียที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนยัง

ไม่เป็นที่แน่นอนว่าเกิดขึ้น ณ ความเข้มข้นใด มีรายงานถึงความเข้มข้นของโซเดียมที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์อยู่เป็นจำนวนมาก โดยค่าความเข้มข้นในรายงานเหล่านี้มีค่าอยู่ประมาณ 6 - 40 ก./ล. (McCarty, 1964)

ความเข้มข้นที่กระตุ้น และยับยั้งของไอออนบวกแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ความเข้มข้นที่กระตุ้นและยับยั้งของไอออนบวก

ที่มา: (McCarty, 1964)

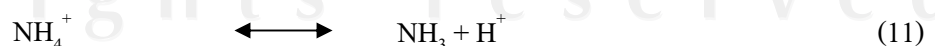
ชนิดไอออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na ⁺	100-200	3,500-5,500	8,000
K ⁺	200-400	2,500-4,500	12,000
Ca ²⁺	100-200	2,500-4,500	8,000
Mg ²⁺	75-150	1,000-1,500	3,000

(2) พืชของโลหะหนัก

โลหะหนักที่อาจเป็นพืชต่อแบคทีเรีย ได้แก่ แมงกานีส, สังกะสี, แคดเมียม, นิกเกิล, โคบอลต์, ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปไอออน พบว่าลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะเรียงตามลำดับดังนี้ คือ ทองแดง, เหล็ก, แคดเมียม และสังกะสี แต่ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ถ้ามีปริมาณซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะสามารถรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้

(3) พืชของแอมโมเนีย

แอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากการย่อยสลายพวกโปรตีน ซึ่งมีไนโตรเจนอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนีย และแอมโมเนียไอออน ดังสมการที่ 11



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกริยาจะดำเนินไปทางขวา ดังนั้นที่พีเอชสูงขึ้นก็จะมีแอมโมเนียอยู่ในระบบมากขึ้น แอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่าแอมโมเนียไอออน ผลของแอมโมเนียในโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแสดงได้ ดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ผลของแอมโมเนียในโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน
ที่มา: (McCarty, 1964)

แอมโมเนียในโตรเจน (มก./ล.)	ผลต่อระบบ
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 - 1,000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1,500 - 3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
มากกว่า 3,000	เป็นพิษโดยตรง

(4) พิษของซัลไฟด์

ถ้าปริมาณของซัลไฟด์ในระบบมีความเข้มข้นถึงระดับหนึ่ง ซัลไฟด์จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ไม่ว่าซัลไฟด์นั้นจะมาจากน้ำเสียที่เข้าระบบหรือการย่อยสลายของซัลเฟตก็ตาม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนบวกในระบบด้วย เพราะถ้าในระบบมีโลหะหนักซัลไฟด์ลดลงได้

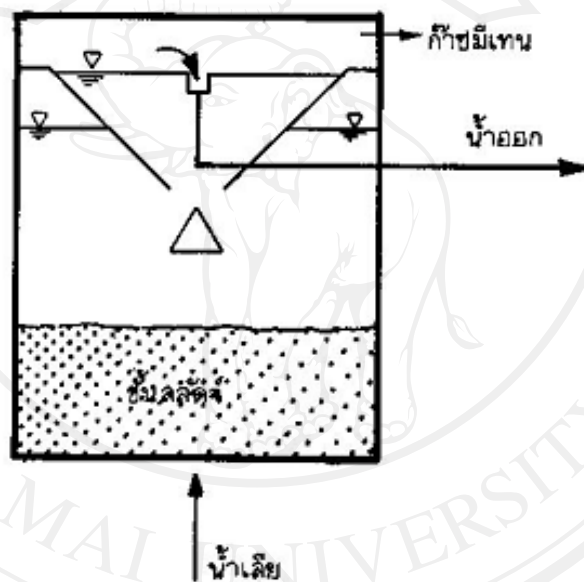
2.4 ระบบยูเอเอสบี

2.4.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีเริ่มมีการพัฒนาครั้งแรกในทศวรรษที่ 1970 ที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ มีการออกแบบให้ระบบหมักสามารถรักษาระดับจุลินทรีย์ให้อยู่ในถัง ถังมีลักษณะเป็นท่อ และสารอาหารจะถูกสูบเข้าด้านล่างของถังปฏิกรณ์ จุลินทรีย์จะจับกันเป็นเม็ดตะกอนลอยอยู่ภายในถังด้วยแรงดันของน้ำเสียที่ป้อนเข้าไปและก๊าซที่เกิดขึ้น ทำให้มีการสัมผัสระหว่างสารอาหารกับเม็ดตะกอนมากขึ้น ทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว น้ำที่ผ่านการบำบัดจะไหลออกจากด้านบน และได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้แยกน้ำเสีย ตะกอน และก๊าซ (gas-solid separator, GSS) ในปี ค.ศ. 1978 ถึงปฏิกรณ์ยูเอเอสบี เริ่มถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และในปัจจุบันได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย (Lettinga et al., 1983)

2.4.2 หลักการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบที่มีการป้อนน้ำเสียเข้าด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนถึงปฏิกรณ์ โดยแบคทีเรียที่อยู่กันอย่างหนาแน่นและรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอน (granule) ซึ่งมีความเร็วในการจมตัวสูง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการยึดเกาะ หรือวัสดุใดๆ เพื่อช่วยในการพยุงมวลของกลุ่มแบคทีเรีย โดยทั่วไปถึงปฏิกรณ์ยูเอเอสบี จะเป็นรูปทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยม ลักษณะของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังนี้ ส่วนของตะกอนชั้นล่าง (sludge bed) เป็นชั้นตะกอนที่มีความหนาแน่นของแบคทีเรียสูงจะจับตัวกันเป็นเม็ดตะกอน ซึ่งมีความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนสูง และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้สูง ส่วนของชั้นตะกอนลอย (sludge blanket) เป็นชั้นตะกอนเบาที่ลอยฟุ้ง มีความสามารถในการจมตัวของตะกอนต่ำ แสดงดังรูป 2.2



รูป 2.2 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี

ที่มา: (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

ส่วนอุปกรณ์แยกตะกอนและก๊าซชีวภาพเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกก๊าซชีวภาพออกจากน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ ประกอบด้วยแผ่นเอียง 45-60 องศา โดยที่น้ำผ่านการบำบัดจะไหลออกทางด้านบนของถัง ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นสูงก็จะจมสู่ก้นถัง ส่วนที่เบาก็จะหลุดออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัด ส่วนก๊าซชีวภาพจะถูกรวบรวมเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงต่อไป

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลขึ้นด้านบนของถังปฏิกรณ์ ซึ่งมักมีฟอง (scum) เกิดขึ้นที่ผิวของน้ำ และมีบางส่วนหลุดไปกับน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ สามารถป้องกันได้โดยการ ติดครีป (Baffle) กันตรงทางน้ำออก

ปัจจัยสำคัญของระบบยูเอเอสบีคือ การทำให้แบคทีเรียรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอน ที่มีขนาดใหญ่ และสามารถจมตัวได้ดี ทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง และมีความสามารถในการกักเก็บตะกอนได้สูง ทำให้ตะกอนไม่หลุดออกจากระบบ ถ้าไม่สามารถทำให้ตะกอนมีลักษณะ ดังกล่าวได้ จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพด้อยลง และทำให้ข้อดีของระบบยูเอเอสบีหายไป

2.4.3 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี

การออกแบบถังยูเอเอสบี สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

(1) กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นเดียว (one step treatment process or single anaerobic digestion process) จะมีถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว และมีแบคทีเรียทั้งหมดทุกกลุ่มทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมือนกันแต่ทำหน้าที่ต่างกัน

(2) กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ 2 ขั้น (two step treatment process or two phase anaerobic digestion process) การทำงานของระบบแยกการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (acid former) กับกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (methane former) ออกจากกัน ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างถังหมักกรดเพิ่มอีก 1 ถัง

การเลือกใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย และการออกแบบถัง น้ำเสียที่มีอนุภาคแขวนลอยและย่อยสลายยาก มักมีการใช้การย่อยสลายแบบ 2 ขั้น โดยใช้ถังหมักกรดช่วย

2.4.4 การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ (immobilization)

การรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้คงอยู่อย่างหนาแน่นไม่หลุดออกนอกระบบ นั้นเป็นลักษณะเด่นของระบบยูเอเอสบี ถ้าไม่สามารถกักเก็บตะกอนได้ก็ไม่มีประโยชน์อะไรในการเลือกใช้ระบบยูเอเอสบี การทำให้สามารถกักเก็บจุลินทรีย์ได้ ต้องสามารถทำให้ตะกอน จุลินทรีย์จับตัวกันอย่างหนาแน่นจนกลายเป็นเม็ดตะกอน และใช้อุปกรณ์แยกก๊าซ ตะกอน และน้ำ เสีย ช่วยทำให้ลดการหลุดออกนอกระบบของตะกอนจุลินทรีย์ได้

2.4.5 การกระจายน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

การป้อนน้ำเสียเข้าระบบควรทำให้มีการสัมผัสระหว่างตะกอนจุลินทรีย์กับน้ำเสียอย่างทั่วถึง เพื่อไม่ให้เกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย (short circuit) ถ้าเกิดการไหลลัดวงจรจะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนไม่ได้รับสารอาหาร ทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพในการทำงานไม่เต็มที่

2.4.6 อัตราภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์

ภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมีค่าอัตราภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์มากกว่าระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ในการออกแบบค่าอัตราภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ควรต่ำกว่าอัตราสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัย ในกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นมากกว่าปกติในช่วงเวลาสั้นๆ (shock load)

2.4.7 ตะกอนเริ่มต้น (seed sludge)

ตะกอนเริ่มต้นสามารถนำมาจากแหล่งอื่นที่มีการสร้างให้เป็นเม็ดตะกอนแล้ว หรือสร้างเม็ดตะกอนขึ้นเอง โดยใช้ตะกอนเริ่มต้นจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่างๆ นำมาเป็นตะกอนเริ่มต้นในการสร้างเม็ดตะกอน Lettinga et al. (1983) พบว่า การใช้ Digested Sewage Sludge เป็นตะกอนเริ่มต้นในการเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบีสามารถสร้างเป็นเม็ดตะกอนได้ การสร้างเม็ดตะกอนยังสามารถใช้ตะกอนจากระบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) ได้อีกด้วย Noyola and Moreno (1994) การสร้างเม็ดตะกอนขึ้นเองจากตะกอนเริ่มต้นอาจใช้เวลาค่อนข้างนานในการเริ่มต้นเดินระบบ แต่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อเม็ดตะกอนจากแหล่งอื่น

2.4.8 ความเร็วไหลขึ้นของของเหลว (liquid upflow velocity)

ค่าของความเร็วไหลขึ้นที่ดีต้องเป็นความเร็วที่ทำให้ชั้นตะกอนมีการยับขึ้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์ได้รับสารอาหารทั่วถึงรวมถึงเป็นการช่วยระบายก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ และก๊าซที่เกิดขึ้นยังช่วยในการกวนตะกอนอีกด้วย

2.4.9 ความเร็วในการจมตัวของตะกอนจุลินทรีย์

เม็ดตะกอนที่ดีควรมีความเร็วในการจมตัวสูง เพื่อไม่ให้หลุดออกนอกระบบ Lettinga et al. (1983) เสนอว่าความเร็วในการจมตัวของตะกอนที่จะทำให้เกิดตะกอนเม็ดที่ดีควรอยู่ในช่วง 2-90 ม./ชม. แต่ Hulshoff (1989) กล่าวว่าค่าความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนเฉลี่ย คือ

80-90 ม./ชม.

2.4.10 ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (hydraulic retention time: HRT)

ระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียเท่ากับ 4-24 ชั่วโมง ถ้าเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกปานกลาง (ค่า COD 1,000-3,000 มก./ล.) อาจใช้เวลา 3-8 ชั่วโมง ถ้าเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูง (ค่า COD 10,000-15,000 มก./ล.) อาจใช้เวลามากกว่า 1 วัน (Lettinga et al., 1983)

2.4.11 ปริมาณตะกอนเริ่มต้น

ควรเลือกปริมาณตะกอนเริ่มต้นให้เหมาะสมกับถังปฏิกรณ์ โดยทั่วไป จะใช้ปริมาณตะกอนเริ่มต้นประมาณ 10-15 กก.วีเอสเอสต่อลบ.ม.

2.5 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีได้ถูกพัฒนามาเมื่อไม่นานมานี้ เป็นระบบที่มีการปรับปรุงข้อดีของระบบถังกรองไร้อากาศ (anaerobic filter) ได้เป็นอย่างดี ในปัจจุบันได้มีการนำระบบยูเอเอสบีมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายรวมถึงประเทศไทยด้วย เช่น โรงงานผลิตสุรา โรงงานผลิตเบียร์ โรงงานน้ำอัดลม บ.เสริมสุข(ปทุมธานี)จก. เป็นต้น ซึ่งหลายแห่งได้นำ ก๊าซมีเทนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตของโรงงานอีกด้วย ระบบยูเอเอสบีมีข้อดีอยู่มาก อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีข้อเสียอยู่บ้างดังต่อไปนี้

2.5.1 ข้อดี

- (1) ประหยัดพลังงานเนื่องจากไม่ต้องเติมอากาศ
- (2) ได้พลังงานเป็นก๊าซมีเทน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- (3) ไม่ต้องอาศัยตัวกลางเพื่อให้แบคทีเรียยึดเกาะ ตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินน้อย
- (4) สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง

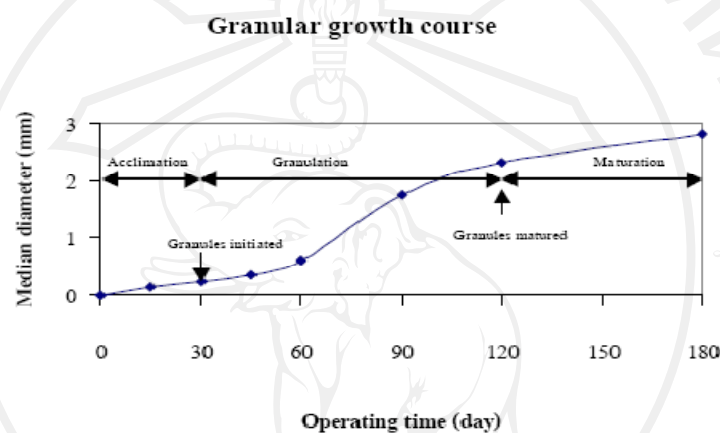
2.5.2 ข้อเสีย

- (1) ใช้เวลาก่อนขำงนานในการเริ่มต้นเดินระบบ
- (2) ต้องเลี้ยงให้เกิดเมืงตะกอนเพื่อควบคุมการกักเก็บตะกอนให้อยู่ในระบบ
- (3) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนมีความไวต่อค่าพีเอช

- (4) ไม่สามารถบำบัดได้อย่างสมบูรณ์ด้วยตัวเอง เนื่องจากยังมีสารตัวกลาง (intermediate) หลงเหลืออยู่
- (5) ผู้ชำนาญด้านระบบยูเอเอสบียังมีไม่มากนัก

2.6 กระบวนการเกิดเม็ดตะกอน (granulation process)

กระบวนการการเกิดเม็ดตะกอน Yan and Tay (1997) ได้แบ่งเป็นช่วงกว้างๆดังรูป 2.3 ตามระยะเวลาการเกิด และขนาดของเม็ดตะกอน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ



รูป 2.3 กระบวนการเกิดเม็ดตะกอน

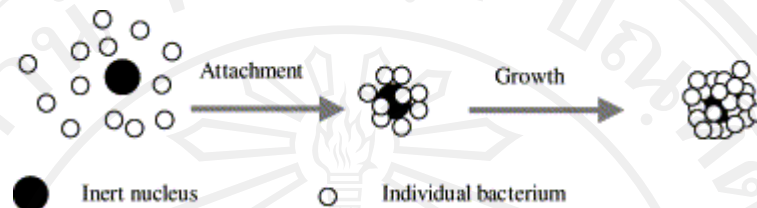
2.6.1 Acclimation Phase ช่วงของการปรับตัวของแบคทีเรียให้เข้ากับสิ่งแวดล้อม แบคทีเรียเริ่มปรับตัว และจับตัวกันบริเวณด้านล่างของชั้นตะกอน และเป็นการเริ่มเร่งการเติบโตที่เรียกว่า จุดเริ่มต้นของการเกิดเม็ดตะกอน (granulation initiated) ระยะนี้การเติบโตจะเริ่มอย่างช้าๆ และมีค่าจำเพาะของการเติบโต (specific growth rate) ประมาณ 20 % หรือต่ำกว่าของค่าจำเพาะของการเติบโตสูงสุดในช่วง Granulation Phase

2.6.2 Granulation Phase ช่วงของการเกิดเม็ดตะกอนตั้งแต่จุดเริ่มต้นของการเกิดเม็ดตะกอน (Granulation Initiated) จนถึงจุดที่เม็ดตะกอนเติบโตเต็มที่ (Granules Matured) ช่วงนี้มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว มีค่าจำเพาะของการเติบโต เท่ากับ 0.10 วัน^{-1}

2.6.3 Maturation Phase ช่วงที่เม็ดตะกอนเติบโตเต็มที่จะมีอัตราการเติบโตต่ำขนาดของเม็ดตะกอนค่อนข้างคงที่

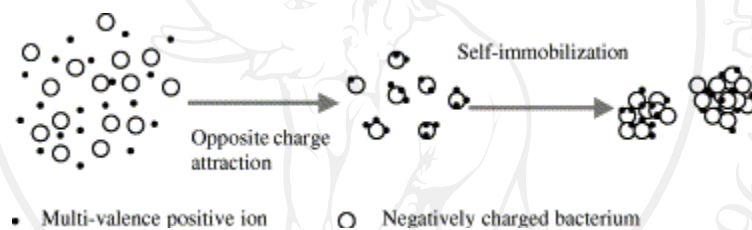
2.7 กลไกและแบบจำลองในกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนของระบบยูเอเอสบี

การเริ่มต้นเดินระบบยูเอเอสบีต้องใช้เวลา นาน Liu et al. (2003) ได้รวบรวมกลไก และแบบจำลองในกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนของระบบยูเอเอสบี เช่นแบบจำลองจากรูป 2.4, 2.5 และ 2.6



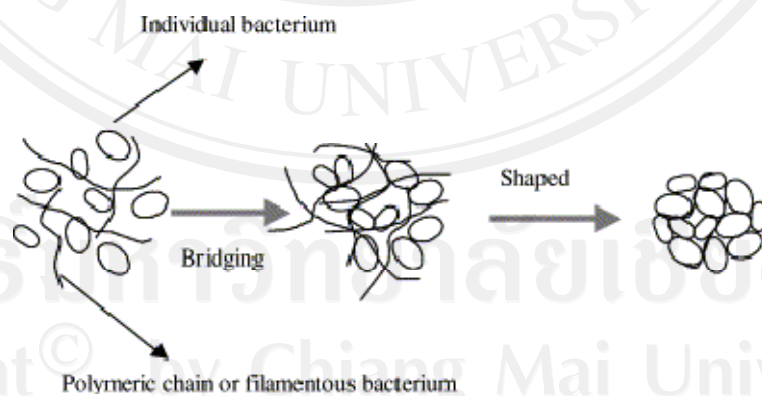
รูป 2.4 การเกิดเม็ดตะกอนแบบ Inert Nuclei Model

ที่มา : (Liu et al.,2003)



รูป 2.5 การเกิดเม็ดตะกอนแบบ Multi-valence Positive Ion-bonding Model

ที่มา : (Liu et al.,2003)



รูป 2.6 การเกิดเม็ดตะกอนแบบ Polymer or Filament Bonding Model

ที่มา : (Liu et al.,2003)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจและมีการพัฒนาเพื่อให้การเริ่มต้นเดินระบบใช้ระยะเวลาสั้นลง ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนย้ายทางฟิสิกส์ ทำให้มีการชนกันสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรีย หรือ การดึงดูดของแบคทีเรียบนผิวนิวคลีโอ (nuclei) แรงที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้ได้แก่

Hydrodynamic force (แรงดันของน้ำ)

Diffusion force (แรงจากการแพร่)

Gravity force (แรงโน้มถ่วงของโลก)

Thermodynamic force เช่น การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

Cell mobility (การเคลื่อนที่ของเซลล์)

ขั้นตอนที่ 2 แรงดึงดูดที่ทำให้รักษาเสถียรภาพ และเซลล์สัมผัสกัน แรงดึงดูดเหล่านี้ได้แก่

Physical Forces

Van der Waals forces

แรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามกัน

Thermodynamic forces รวมถึงพลังงานอิสระของเอนทัลปี เช่น แรงดึงดูด

Hydrophobicity

สายใยแบคทีเรียที่สามารถเชื่อมเซลล์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน

Chemical Forces

การประสานของ Hydrogen

การก่อตัวของ Ionic pairs

การก่อตัวของ Ionic triplet

อนุภาคของการเชื่อมระหว่างกันและอื่นๆ

Biochemical Forces

การทำให้พื้นผิวเซลล์แห้ง

การละลายเยื่อหุ้มเซลล์

การให้สัญญาณและการรวมกลุ่มในแบคทีเรีย

ขั้นตอนที่ 3 Microbial Force ในการทำให้การรวมตัวใหญ่ขึ้นเต็มที่ ได้แก่

ผลผลิตของ Extracellular Polymer โดยแบคทีเรีย เช่น Exopolysaccharides

การเติบโตจากการรวมตัวของเซลล์

การเปลี่ยนแปลง Metabolic และความสามารถทางพันธุกรรมที่ถูกกลดลงโดยสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เซลล์มีปฏิสัมพันธ์กันสะดวกขึ้นและเป็นผลให้โครงสร้าง Microbial เรียงตัวกันสูง

2.8 ลักษณะของเม็ดตะกอน

ระบบยูเอเอสบีมีลักษณะเด่นที่การจับตัวกันของแบคทีเรียจนกลายเป็นเม็ดตะกอน เม็ดตะกอนที่ดีควรมีลักษณะเป็นทรงกลม มีความหนาแน่นสูง มีความสามารถในการจมตัวของเม็ดตะกอนได้ดี ความแข็งแรงทนต่อการรับแรงเฉือน และเม็ดตะกอนควรมีขนาดตั้งแต่ 0.5 – 5 มม.

ลักษณะของเม็ดตะกอนจะขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนเริ่มต้น ชนิดของน้ำเสีย ความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสีย สารอาหารเสริม เป็นต้น เม็ดตะกอนประกอบด้วยโครงสร้าง 3 ชั้น ดังนี้ Methanotrix aggregates rod เป็นแกนกลาง และล้อมรอบด้วย Methanotrix ที่เป็นสาย ชั้นที่ 2 เป็น Acetogenic bacteria Hydrogen-utilizer bacteria ส่วนชั้นนอกสุดเป็น Acid-forming bacteria (McLeod et al., 1990)

ลักษณะของเม็ดตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุราและใช้ตะกอนเริ่มต้นจากตะกอนที่ข่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนพบว่า เม็ดตะกอนมีโครงสร้างเหมือนเม็ดตะกอนทั่วไป คือ มีทั้งขอบนอกและชั้นภายใน (แบบ multilayer) ประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ สายพันธุ์ที่สำคัญในช่วงเริ่มต้นเดินระบบคือ Methanotrix sp. เม็ดตะกอนมีความแข็งแรง ซึ่งในการรวมตัวเป็นโครงข่ายทำให้มีความเสถียรภาพทั้งโครงสร้าง (Ramos et al., 1994)

2.9 สรุปสาระสำคัญที่เกี่ยวข้อง

Sabry (2008) ศึกษาถึงการใช้ตะกอนที่เป็น Flocculent และ Granular ในการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกริยายูเอเอสบี เพื่อศึกษาความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเวลากักเก็บน้ำจะกั้นหนันในการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งสูงในถังปฏิกริยายูเอเอสบี โดยการทดลองใช้แบบจำลองยูเอเอสบี ขนาด 3.75 ล. ความสูง 0.97 ม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.07 ม. ชุดการทดลองแรกใส่ตะกอน Flocculent ที่มาจากระบบน้ำเสียชุมชนแบบไร้อากาศ และชุดการทดลองที่สองใส่ตะกอน Granular นำมาจากระบบยูเอเอสบีในโรงงานอุตสาหกรรม มีการควบคุมชีโอดี ที่ช่วง 700-1000 มก./ล. มีของแข็งแขวนลอย ประมาณ 50-70% ของชีโอดีรวมทั้งหมด คุณสมบัติแวดล้อม และอุณหภูมิที่ $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ขึ้น โดยทำมาจากอาหารสุนัข ดิน ชูโครส และแป๊ปโทน (โดยให้สัดส่วนของโปรตีน 50% คาร์โบไฮเดรต 40% และไขมัน 10%) การดำเนินการจะใช้การเปลี่ยนแปลงค่าเวลากักเก็บน้ำ ออกเป็นสองช่วง แต่ละช่วงจะใช้ระยะเวลา 4 วัน คือ ช่วงแรกจะใช้ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2ชม. ช่วงที่สองจะใช้ระยะเวลากักเก็บน้ำ 1ชม. โดยจะดำเนินการเวลา 8-10 น.

และ 16-18 น. ช่วงอื่นนอกเหนือจากนี้จะใช้ระยะเวลาเก็บน้ำที่ 6 ชม. มีการวัดปริมาณชีโอดีรวมทั้งหมด, ชีโอดีละลายน้ำ, ของแข็งระเหย, ของแข็งแขวนลอย และ VFA ทุกๆครึ่งชั่วโมง เป็นเวลารวมสองชั่วโมง หลังจากสองชั่วโมงแรกที่ทำเปลี่ยนแปลงค่าเวลาเก็บน้ำแล้วจะวัดทุกๆหนึ่งชั่วโมง

ผลของการทดลองแม้ว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงเวลาเก็บน้ำ แต่การดำเนินงานของทั้งสองชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการลดชีโอดีรวมทั้งหมด คือ ตะกอนที่เป็น Flocculent และ Granular สามารถลดปริมาณชีโอดีรวมทั้งหมด 89% และ 87% ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าตะกอนที่เป็น Flocculent มีประสิทธิภาพดีกว่าตะกอนที่เป็น Granular เล็กน้อย

Karim and Gupta (2006) ศึกษาถึงผลของ Shock and Mixed Nitrophenolic Loadings ในถังปฏิกริยาเยื่อเออสปี 3 ชุด แต่ละชุดการทดลองมีถังปฏิกริยาปริมาตร 12.5 ลิ. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในถังปฏิกริยา 10 ซม. สูง 1.2 ม. และมี Hopper สูง 15 ซม. รักษาภายใต้อุณหภูมิ $27 \pm 4^{\circ}\text{C}$ น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์จาก Methanol (COD 2,000 มก./ลิ.), Sodium Nitrate (NO_3^- -N 200 มก./ลิ.) และสารอาหารอื่น ในถังปฏิกริยาที่ 1, 2 และ 3 ใช้สาร 2-nitrophenol (2-NP), 4-nitrophenol (4-NP) และ 2,4-dinitrophenol (2,4-NP) ตามลำดับ โดยค่าเริ่มต้น Normal Nitrophenolic Loading ใช้ความเข้มข้น 30 มก./ลิ. หลังจากทุกๆ 4 วัน ทำการเพิ่มสารให้มีความเข้มข้น 45, 60, 75, 90 and 120 มก./ลิ. ตามลำดับ โดยใช้เวลากักเก็บน้ำ 24 ชม.

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นการปรับตัวของตะกอน Granular เมื่อได้รับค่า Shock Load ระบบจะสามารถปรับลดค่าให้กลับมาสู่ภาวะ NNL ภายในระยะเวลา 4 วัน ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร ประสิทธิภาพในการลดสารในชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่ความเข้มข้น 30 มก./ลิ. พบว่าสามารถย่อยสลาย 2-NP, 4-NP และ 2,4-DNP เท่ากับ 79.2%, 77.5% และ 33% ตามลำดับ ความเข้มข้นของ COD มีการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มค่า Shock Load แต่ไม่มีผลกระทบต่อ NO_3^- -N ซึ่งมีค่าลดลงมากกว่า 95% ในทุกกรณี

Hussain et al. (2008) ศึกษาถึงผลของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีฟีนอลในระบบเยื่อเออสปี ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกริยาเยื่อเออสปีขนาด 10 ลิ. ควบคุมอุณหภูมิที่ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$. การศึกษาดำเนินการมี 4 ระยะ น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าชีโอดี เท่ากับ 1000 มก./ลิ. น้ำเสียสังเคราะห์ใช้จากสาร NaHCO_3 150 มก./ลิ. H_3BO_3 0.05 มก./ลิ. $\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2 มก./ลิ. ZnCl_2 0.05 มก./ลิ. $\text{COCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2 มก./ลิ. $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.05 มก./ลิ. $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.03 มก./ลิ. $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.05 มก./ลิ. MgCl_2 1.0 มก./ลิ. MnCl_2 0.25 มก./ลิ. EDTA 0.05 มก./ลิ.

MnSO₄ 0.5 มก./ล. NiCl₂ · 6H₂O 0.25 มก./ล. HCl 1.0 มก./ล. ตามลำดับ และใช้ฟีนอลละลายน้ำ เสียสังเคราะห์อีกทั้งเพิ่ม NH₄Cl และ K₂HPO₄ ที่ค่าหลากหลาย เนื่องจากเป็นต้นกำเนิดของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ระยะที่ 1 มีการเติมฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์(Phenol COD)ให้มีความเข้มข้นของฟีนอลภายในถึงปฏิกิริยาที่ 420 มก./ล. ภายในระยะเวลา 48 วัน ระยะที่ 2 มีการเติมฟีนอลซีโอดี และฟอสฟอรัสในอัตราส่วน 300: 1 และศึกษาค่าผันแปรไนโตรเจนที่ ฟีนอลซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส(Phenol COD:N:P) จาก 300: 10: 1 ถึง 300: 1: 1 ระยะเวลาที่เก็บน้ำถูกลดจาก 12 ถึง 6 ชม. ระยะที่ 3 ศึกษาการแปรค่าอัตราส่วนฟีนอลซีโอดีต่อฟอสฟอรัสจาก 300: 1 ถึง 300: 0 ในน้ำเสียที่มีฟีนอลซีโอดีต่อไนโตรเจน เท่ากับ 300: 1 ระยะที่ 4 ศึกษาการแปรผันค่าฟีนอลซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสจาก 300: 1: 0.1 ถึง 300: 0: 0.1 โดยระยะที่ 3 และ 4 มีการแปรค่าระยะเวลาการกักเก็บน้ำตามความเหมาะสม เนื่องจากฟีนอลมีคุณสมบัติยากต่อการย่อยสลาย

ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 6 ชม. และที่ค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 300:1:0.1 ฟีนอลถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนมากกว่า 90% ในน้ำออกจากระบบมีไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 80% ของน้ำเข้าระบบ การเติมสารอาหารน้ำมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของชีวมวล ซึ่งการเจริญเติบโตของชีวมวลต้องการค่า COD:N:P เท่ากับ 300:1.8:0.36 การลดลงของปริมาณสารอาหารเกิดจากการทำงานของเซลล์ โดยค่า Average Cell Yield เท่ากับ 3.5% ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในเซลล์มีค่า 10-14% และ 0.6-2.4% ตามลำดับ และการลดลงของตะกอนส่งผลต่อประสิทธิภาพระบบที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสน้อยกว่า 300:1:0.1

Yu et al. (2001) ศึกษาถึงผลของแคลเซียมในกระบวนการสร้างตะกอนขณะเริ่มต้นดำเนินระบบยูเอเอสบี น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 4,000 มก.ซีโอดี/ล. มีค่าอัตราส่วน ซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 200 : 4 : 1 คุณสมบัติเป็นกรดเป็นด่างด้วย Sodium Bicarbonate และคุณสมบัติที่ 35±2 °ซ. โดยใช้ถึงปฏิกิริยาจำนวน 6 ชุด ถึงปฏิกิริยาที่ 1 ไม่มีการเติมแคลเซียมออกไซด์ ส่วนถึงปฏิกิริยาที่ 2 ถึง 6 มีการเติมแคลเซียมออกไซด์โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ Ca²⁺ จาก 10 มก./ล. ถึง 150, 300, 450, 600 และ 800 มก./ล. ตามลำดับ

การศึกษาพบว่าผลของแคลเซียมในกระบวนการสร้างตะกอนขณะเริ่มต้นดำเนินการระบบยูเอเอสบีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ช่วงความเข้มข้นของ Ca²⁺ 150 - 300 มก./ล. จะเกิดการสะสมชีวมวล(biomass) และกระบวนการสร้าง Granular ในถังปฏิกิริยายูเอเอสบีโดยแคลเซียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวหลักในการตกตะกอน Specific Methanogenic Activity ของตะกอนลดลงเมื่อ

ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นสัญญาณการต่อต้านพิษจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดตะกอนในสามขั้นตอน คือ การดูดซับ(adsorption) แร้งยึดติด(adhesion) และ การเพิ่มของจุลชีพ (multiplication)

Schmidt and Ahring (1993) ได้ศึกษาผลของแมกนีเซียมต่อการย่อยสลายอะซิเตตของเม็ดตะกอน(acetate-degrading granular sludge) ในระบบยูเอเอสบี ทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกริยาเยื่อเอสบีปริมาตร 200 มล. จำนวน 5 ชุดทดลอง แต่ละชุดการทดลองมีการเติมสารอะซิเตต 3 ก. ซีโอดี/ล. และเติม Mg^{2+} ที่เตรียมจากสาร $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ความเข้มข้นต่างกันที่เข้าระบบในแต่ละชุดการทดลอง คือ 0, 12.15, 243.05, 729.15 และ 2430 มก./ล. ลำดับ เวลาเก็บกักน้ำ 9 ชั่วโมง ความคุมอุณหภูมิ $55^{\circ}C$ ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า ทุกชุดการทดลองสามารถลดค่า อะซิเตตได้มากกว่า 90 % การดำเนินระบบควรควบคุมความเข้มข้นของ Mg^{2+} ให้มีค่าน้อยกว่า 729 มก./ล. เพื่อลดการสูญเสียชีวมวล และระบบยูเอเอสบีจะมีประสิทธิภาพที่ดีที่ค่าความเข้มข้นของ Mg^{2+} เท่ากับ 12.15 และ 243.05 มก./ล.

Ahn et al. (2006) ได้ทำการศึกษา ผลของแคลเซียมต่อการย่อยสลายน้ำเสียมูลสุกรในถังหมักแบบไร้ออกซิเจน เพื่อศึกษาผลเชิงบวก และลบในการย่อยสลายน้ำเสียมูลสุกร ซึ่งจัดเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง น้ำเสียมูลสุกรนำมาจากฟาร์มสุกร ซึ่งมี VS 44.5 ก./ล. ตะกอนเริ่มต้นนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศเกาหลี การทดลองทำในระบบจริงเป็นถังหมักรูปไข่ (egg-shaped digester) ปริมาตร 7,000 ลบ.ม. ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 31 ± 4 วัน คุมอุณหภูมิที่ $31 \pm 1^{\circ}C$ ความเป็นกรดค่าที่ 6.9 ± 0.1 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.61 ± 0.10 กก.วีเอส/($m^3 \cdot$ วัน) การทดลองมี 5 ถัง แต่ละถังจะใส่ $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0, 1, 3, 5 และ 7 ก./ล. ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในถังที่มีความเข้มข้น 3 ก./ล. ประสิทธิภาพจะลดลงในถังที่มีความเข้มข้น 5 และ 7 ก./ล. และมีการย่อยสลายน้อยมากในถังที่มีความเข้มข้น 0 แล 1 ก./ล. และพบว่า ปริมาณแคลเซียมที่เหมาะสมจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพ และปริมาณแคลเซียมที่น้อยหรือมากเกินไปก็ส่งผลยับยั้งการทำงานของระบบ

Langerak et al. (1998) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมที่สูงในการพัฒนาของตะกอนในระบบยูเอเอสบี ทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกริยาเยื่อเอสบีระดับห้องปฏิบัติการปริมาตร 4.5 ล. จำนวน 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีการเติมสารอะซิเตต บิวทิเรต และ Ca^{2+} จากสาร $Ca(OH)_2$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 1,200 และ 600 มก./ล. ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3

และ 4 มีการเติมมีการเติมสารอะซิเตต บิวทิเรต กลูโคส และ Ca^{2+} จากสาร $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 1,200 และ 600 มก./ล. ตามลำดับ และมีการเติม NaOH และ NaHCO_3 ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน เพื่อปรับค่า Alkalinity ทั้งหมดทุกถังมีการควบคุมอุณหภูมิที่ $30 \pm 2^\circ\text{C}$ เติมน้ำที่อัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์ 14 กก.ชีโอดี/(ม³.วัน) ผลการทดลองพบว่า ที่ค่า Ca^{+2} 1200 มก./ล. ประสิทธิภาพการลดลงของชีโอดีไม่คงที่ ค่า Ca^{2+} น้อยกว่า 600 มก./ล. มีประสิทธิภาพดี คือสามารถลดชีโอดีได้ 98% พบว่า ถังที่มีการเติมกลูโคสจะลดผลกระทบการหลุดออกของตะกอนและเกิดภาวะอะซิโดเจนิกว่า การลดลงของแคลเซียมจะคล้ายกลไกการลดของฟอสเฟต คือมีการตกตะกอนร่วมด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved