

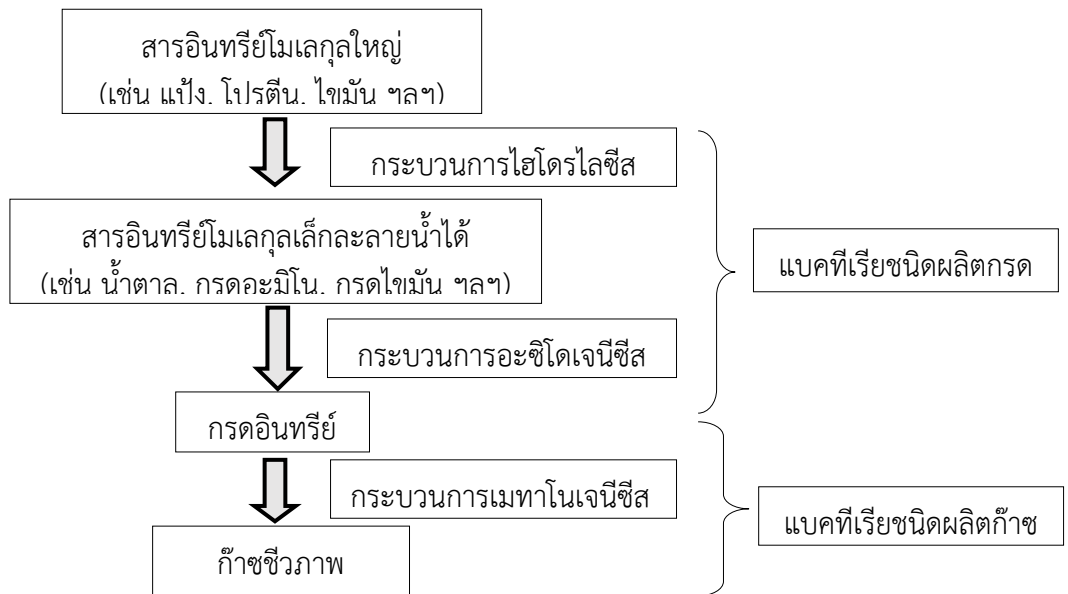
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ศึกษาเรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาผสมกับกากเปียกร่วมกับเชื้อจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสพีของโรงงานผลิตเปียร์ บริษัทขอนแก่นบริวเวอรี่ จำกัด โดยใช้ถังหมักแบบไร้อากาศสองชั้นตอน โดยมีข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งกรดในที่นี้หมายถึงกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพแสดงได้ตามภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553

2.1.1 กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion Process)

แก๊สชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นระบบที่มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ (Organic matter) ปริมาณความเข้มข้นสูง ภายในระบบจะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีออกซิเจนซึ่งประกอบด้วย การย่อยสลายหลายขั้นตอนที่มีความซับซ้อน โดยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่ม แต่ละกลุ่มก็จะทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลาย เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้

ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

คือ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน แป้ง และโปรตีน ที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ เรียกว่า กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis process) ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนกระบวนการสร้างกรดหรือกระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis process) ที่สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำซึ่งถูกสร้างโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria) ย่อยสลายใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยในช่วงแรกของการย่อยสลายขั้นตอนนี้จะถูกแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ทำปฏิกิริยาย่อยสารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ซึ่งโมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอน ไม่เกิน 5 ตัว ในช่วงต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโดเจเนติก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต พอร์เมต ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มผลิตไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ด้วย และขั้นตอนสุดท้ายเป็นกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis process) จะเป็นการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ให้เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methane producing bacteria) ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนที่หนึ่งกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Process)

เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นต้น ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย และองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ แบคทีเรียกลุ่มที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria) และกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria)

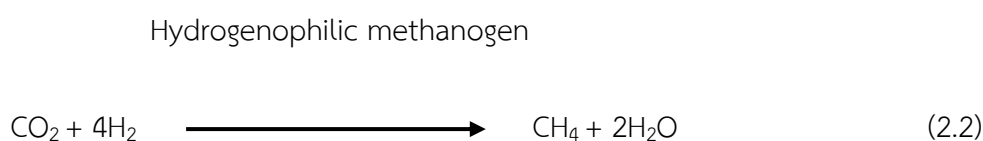
2) ขั้นตอนที่สองกระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis Process)

สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำ ซึ่งถูกสร้างโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative bacteria) ใช้เป็น

แหล่งอาหารและพลังงานโดยในช่วงแรกของการย่อยสลายขั้นตอนนี้ ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งที่โมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรพิโอนิก ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$) กรดบิวทีริก ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$) เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ขั้นตอนต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนนิค (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต ฟอर्मेट ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มผลิตไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ด้วย แต่แบคทีเรียที่ผลิตกรดได้อาจไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดด้วย แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด อาจรวมเรียกว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

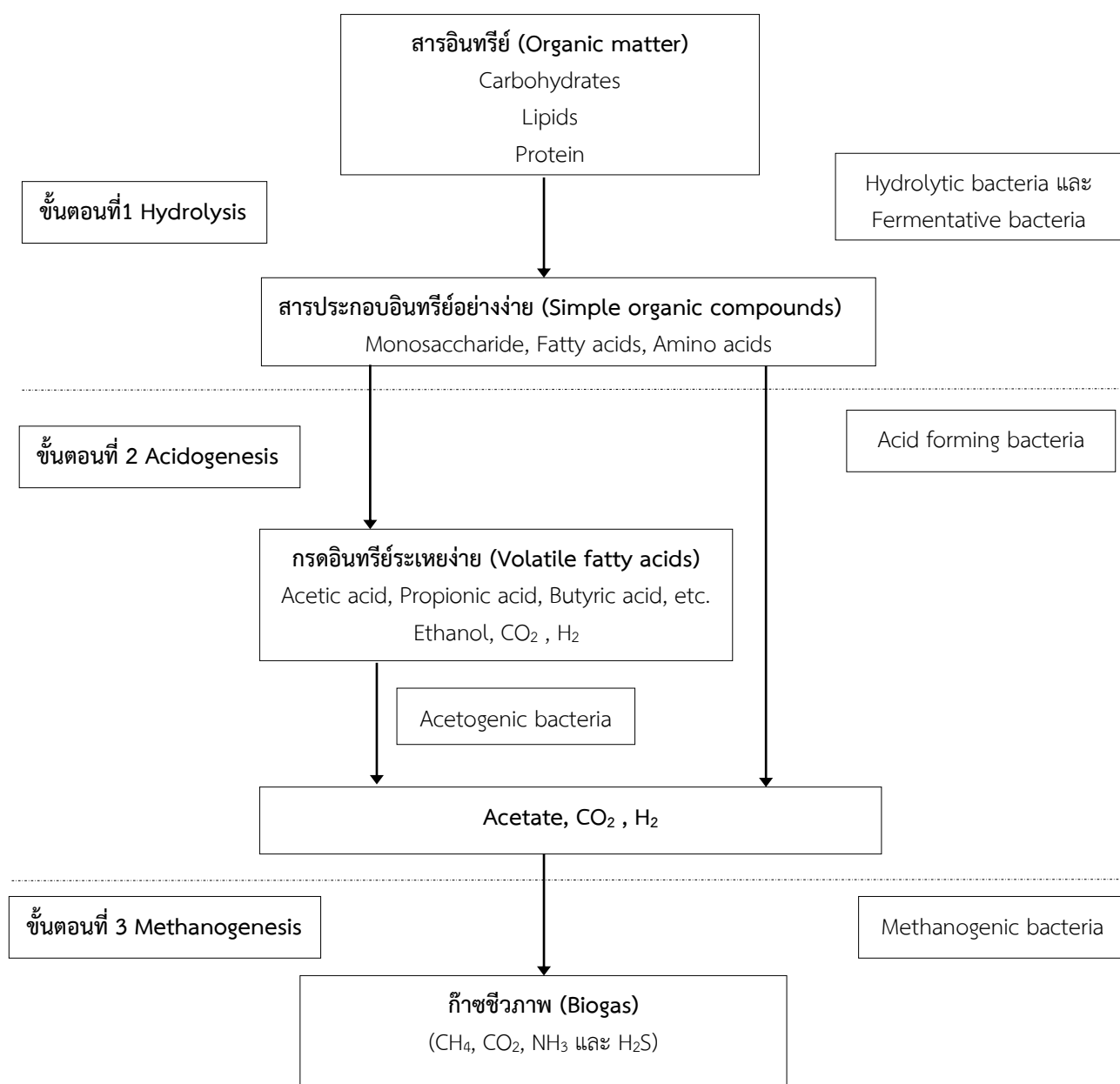
3) ขั้นตอนที่สามารถกระบวนการเมทาโนเจนิซิส (Methanogenesis process)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic forming bacteria) ผลผลิตสุดท้ายคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น ในขั้นตอนนี้การเกิดก๊าซมีเทนจะมีได้เฉพาะสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (Strict anaerobic condition) (Chandra *et al.*, 2012a) เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มนี้และสามารถเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกลางประมาณ 6.8-7.2 (Rajeshwari *et al.*, 2000 ; นฤมล เสาะกระโทก, 2556) อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น ในขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การแบ่งเซลล์จะเพิ่มจำนวนเป็นสองเท่าต้องใช้เวลา 3-5 วัน และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่า เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนที่มีปริมาณเล็กน้อยได้ หรือถ้าพีเอชไม่เหมาะสมก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เป็นต้น สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการผลิตกรดโดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปฏิกิริยา ดังสมการ 2-1 และ 2-2



แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้มีความเฉพาะเจาะจงสูง คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic forming bacteria) ได้แก่ กลุ่ม Acetoclastic methanogenic bacteria (Acetophilic methanogen) และ Hydrogenophilic methanogen ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน
ที่มา: Breure, A.M. and Andel, J.G., 1987

2.1.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกภาค ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกภาค แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane forming bacteria)

1) แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้ คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0 - 6.5 และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง

แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1.1) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria)

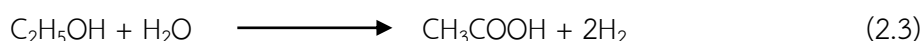
แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกภาค เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดฟอร์มิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้สารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียในกลุ่มนี้ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ชอบออกซิเจน (Anaerobic bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria)

1.2) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซิสและอะซิโตเจนิซิส แล้วเปลี่ยนเป็นให้กรดอะซิติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

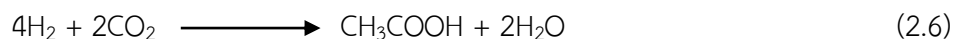
ก) Hydrogen producing acetogenic bacteria

แบคทีเรียในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลายตัว แล้วได้เป็นกรด อะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน หรือกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลผลิต ดังสมการ

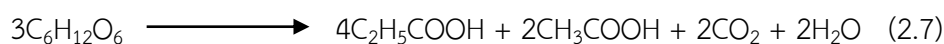


ข) Homoacetogenic bacteria แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

(1) Autotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ในการเจริญเติบโต และได้ผลผลิตสุดท้ายเป็น อะซิเตต (หรือ กรดอะซิติก) ดังสมการ



(2) Heterotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอมในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้มีทั้งอะซิเตตและโพรพิอเนต ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ดังสมการ

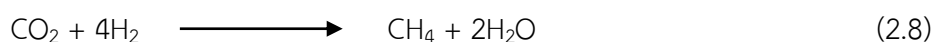


* หมายเหตุ: การที่กรดอินทรีย์ซึ่งเป็นกรดอ่อน เมื่อละลายน้ำแล้วจะอยู่ในรูปเกลือของกรด เรียกว่าเป็น -เอต เช่น กรดอะซิติก เมื่อแตกตัวได้ เป็นอะซิเตต และไฮโดรเจนไอออน

2) แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane forming bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้ไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1) Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs ซึ่งเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการ



แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญ คือ จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนขั้นตอนที่ 2 โดยช่วยคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลง ซึ่งมีส่วนต่อการเกิดอะซิเตตอย่างต่อเนื่อง

2.2) Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria

ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ประมาณ 2 ใน 3 เกิดจากการเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetotrophic methanogens และที่เหลือเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens

2.1.3 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นในการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยในระบบที่เหมาะสม หากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่เจริญเติบโต ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจนอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงต้องเข้าใจถึงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย สภาวะแวดล้อมและปัจจัยดังกล่าวมีดังนี้

1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

- ก) ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส
- ข) ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส
- ค) ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดี คือ ช่วง 30 – 38 องศาเซลเซียส และช่วง 48 – 57 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม การเดินระบบที่ช่วงอุณหภูมิสูง มีข้อเสียที่ Thermophilic bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่ากับ Mesophilic bacteria จึงมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง และการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังสิ้นเปลือง พลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์อีกด้วย

2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นตัวที่วัดค่าความเป็นกรดหรือด่างในระบบ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6–7.4 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งพบว่าในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ โดยสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังปฏิกรณ์คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ โดยถ้ามีการป้อนสารอินทรีย์เข้าไปปริมาณมากเกินไป ก็จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก จนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ ส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบลดลงดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความ

เป็นกรด-ด่างที่ดี เพื่อรับมือกับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ หากระบบมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มากพอ ก็จะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระบบได้

3) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk)

ค่าความเป็นด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยพบว่าค่าความเป็นด่างภายในระบบควรมีอยู่ในช่วง 1,000 – 3,000 มิลลิกรัมของ CaCO_3 /ลิตร ค่าความเป็นด่างที่มีในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศไม่ควรจะต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ CaCO_3 /ลิตร ที่จะช่วยต้านทานกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติ จำเป็นต้องรักษาค่าความเป็นด่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไป เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระบบบำบัด

4) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริก และกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ ของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก ($> 2,000$ มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง ต่อมาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงถึง 4.5 – 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3 – 0.4

วิธีการแก้ไขให้ระบบกลับสู่สภาพสมดุล อาจทำได้ดังนี้

- ตรวจสอบที่มาของการป้อนสารอินทรีย์ที่มากเกินไป
- การแก้ไขอาจเป็นการลดการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ และควรมีบ่อเก็บน้ำเสียสำรอง
- กรณีฉุกเฉินถ้าต้องการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมกับระบบ อาจจะใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น ไม่ควรใช้ปูนขาว Ca(OH)_2 เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้

5) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR)

อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัด

ต่อปริมาตรของบ่อบำบัดต่อวัน (kg COD/m³.วัน) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่การเปลี่ยนอัตราภาระการรับสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

5.1) ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งวิธีนี้จะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic retention time: HRT) ภายในระบบบำบัดด้วย

5.2) การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำเสีย ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานแต่ละประเภทม้องค์ประกอบที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทำได้ง่ายกว่า โดยต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

6) สารพิษ (Toxic substances)

โดยทั่วไปในน้ำเสียมักมีสารพิษหลายชนิดปะปนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโตจนถึงทำให้แบคทีเรียตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลงระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่างๆ พิษของแอมโมเนียมไอออน (NH⁴⁺) เป็นต้น ระดับความเข้มข้นของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ แสดงดังตารางที่ 2.1 สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2553)

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มข้นของสารที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Cu	1
Zn	5
Cr ⁶⁺	5
Cr ³⁺	2,000
Total chromium (Cr)	5
Ni	2
Cd	0.02
S	100
SO ₄ ²⁻	500
Ammonia	1,500
Na ⁺	3,500
K ⁺	2,50
Ca ²⁺	2,500
Mg ²⁺	1,000
Acrylonitrile	5
Benzene	50
CCl ₄	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1

ที่มา: ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2525

2.1.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน ประมาณ 50-70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 30-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แอมโมเนีย (NH₃) ไนโตรเจน (N₂) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ซิลอกเซน (Siloxane) โฟม คราบ(Scum) เมือก และตะกอน เป็นต้น บางครั้งอาจพบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) สูงถึง 1% (10,000 part per million (ppm)) ในกรณีที่น้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบของสารซัลเฟต (SO₄²⁻) สูงดังแสดงในตารางที่ 2.2 (กรมโรงงาน,2551) ซึ่งสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ในขณะการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ องค์ประกอบวัตถุดิบ อุณหภูมิ pH ระยะเวลาการกักเก็บ สารอาหาร และสารพิษ (Deublein and Steinhauser, 2011)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพตามแหล่งวัตถุดิบ

องค์ประกอบ ก๊าซชีวภาพ	หน่วย	ขยะอินทรีย์	น้ำเสีย	พื้นที่ฝังกลบ
CH ₄	% vol	60-70	55-65	45-55
CO ₂	% vol	30-40	35-45	30-40
N ₂	% vol	<1	<1	5-15
H ₂ S	ppmv	10-2000	10-40	50-300

ที่มา: (Rasi et al., 2007)

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการให้ความร้อนและเดินเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าความร้อนสูงและมีสมบัติติดไฟได้ มีเทนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานหลักส่วนออกซิเจนและไนโตรเจนนั้น อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการเติมอากาศในท่อเพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นแม้จะให้พลังงานแต่ก็มีผลเสียต่อระบบการใช้งาน เพราะเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมกับน้ำหรือความชื้นก็จะมีฤทธิ์เป็นกรด เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ นอกจากนั้น ความชื้นยังทำให้เกิดคราบตะกรัน เมื่อกหรือตะกอนจุลินทรีย์ที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Safety Valve ซึ่งมีผลต่อระบบความปลอดภัยของเครื่องจักร ก๊าซชีวภาพที่มาจากขยะชุมชนจะมี Trace gas เช่น ไฮลอกเซน เจือปนอยู่บ้าง ซึ่งไฮลอกเซน ก็จะทำให้เกิดคราบตะกรันซิลิกอน และเกิดการกัดกร่อนในเครื่องจักร เช่น ที่ลูกสูบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อการใช้งาน ซึ่งสมบัติของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.3 และวิธีการคำนวณหาสมบัติของก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นก๊าซผสม เพื่อเข้าใจสมบัติของก๊าซชีวภาพและใช้ในการออกแบบ เลือกอุปกรณ์ เครื่องจักรที่ใช้ในการลำเลียง การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้เหมาะสม และนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 2.3 สมบัติของก๊าซบางชนิดในก๊าซชีวภาพ

สมบัติของก๊าซ	CH ₄	CO ₂	H ₂ S
มวลโมเลกุล [กก./โมล]	16.04	44.01	34.08
ความหนาแน่น (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15° ซ) [กก./ลบ.ม.]	0.68	1.87	1.45
Critical Temperature [°ซ]	-82.7	31	-100
Critical Pressure [บาร์สมบูรณ์]	45.96	73.825	89.37
Compressibility Factor (Z) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15° ซ)	0.998	0.9942	0.9915
Sp. Gr. (เทียบกศอากาศ = 1) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15°ซ)	0.55	1.521	1.189
Specific volume (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 21°ซ) [ลบ.ม./กก.]	1.48	0.547	0.699
Heat capacity at constant pressure (Cp) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ) [กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.035	0.037	0.034
Heat capacity at constant volume (Cv) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ) [กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.027	0.028	-
Ratio , Cp/Cv (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ)	1.3054	1.2938	-
Thermal conductivity (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 0°ซ) [มิลลิวัตต์/เมตร เคลวิน]	32.81	14.65	12.98
High Heating Value (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15.6°ซ) [เมกกะจูล/ลบ.ม.]	37.63	-	12
Lower Heating Value (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15°ซ) [เมกกะจูล/ลบ.ม.]	33.91	-	-
Solubility in water (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 2°ซ) vol/vol	0.054	1.7163	4.67
Auto-ignition temperature [°ซ]	595	-	270

ที่มา: <http://encyclopedia.airliquide.com>

2.1.5 คุณสมบัติและการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซมีเทนมีคุณสมบัติเบากว่าอากาศประมาณครึ่งหนึ่ง (น้ำหนักโมเลกุล 16.04) ละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อยไม่มีรสไม่มีสีไม่มีกลิ่น แต่เนื่องจากกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงมีกลิ่นเล็กน้อย ทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้ทั้งที่แท้จริงแล้ว ก๊าซนี้ไม่ได้ทำให้รสชาติของอาหารเปลี่ยนแปลงแต่ประการใด เนื่องจากเมื่อมีการเผาไหม้ ก๊าซดังกล่าวก็ระเหยไป (ผจญสุข และคณะ , 2560) การนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน ค่าพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพจะขึ้นกับสัดส่วน (%) ของก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในเนื้อก๊าซชีวภาพ

2.1.6 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

1) ด้านพลังงาน เมื่อพิจารณาถึงด้านเศรษฐกิจแล้ว การลงทุนผลิตก๊าซชีวภาพจะลงทุนต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่น ๆ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพ จำนวน 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้ได้ดังนี้

- ให้ค่าความร้อน 3,000-5,000 กิโลแคลอรี ความร้อนนี้จะทำให้น้ำ 130 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เดือดได้

- ใช้กับตะเกียงก๊าซขนาด 60-100 วัตต์ ลูกใหม่ได้ 5-6 ชั่วโมง
- ผลิตกระแสไฟฟ้า 1.25 กิโลวัตต์
- ใช้กับเครื่องยนต์ 2 แรงม้า ได้นาน 1 ชั่วโมง
- ถ้าใช้กับครอบครัวขนาด 4 คน สามารถหุงต้มได้ 3 มื้อ

2) ด้านปรับปรุงสภาพแวดล้อม

โดยการนำมูลสัตว์ และน้ำล้างคอกมาหมักในบ่อก๊าซชีวภาพ จะเป็นการช่วยกำจัดมูลในบริเวณที่เลี้ยงทำให้กลิ่นเหม็นและแมลงวันในบริเวณนั้นลดลงและผลจากการหมักมูลสัตว์ ในบ่อก๊าซชีวภาพที่ปราศจากออกซิเจนเป็นเวลานาน ๆ ทำให้เชื้อพยาธิและเชื้อโรคส่วนใหญ่ในมูลสัตว์ตายด้วย ซึ่งเป็นการทำลายแหล่งเพาะเชื้อโรคบางชนิด เช่น โรคมืด อหิวาต์ และพยาธิที่อาจแพร่กระจายจากมูลสัตว์ด้วยกัน นอกจากนี้แล้วยังเป็นการป้องกันไม่ให้น้ำมูลสัตว์ถูกชะล้างลงไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

3. ด้านการเกษตร

- การทำเป็นปุ๋ย ปากที่ได้จากการหมักแก๊สชีวภาพเราสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้ดีกว่ามูลสัตว์สดๆ และปุ๋ยคอก ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่มีการหมักจะมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในมูลสัตว์ ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

- การทำเป็นอาหารสัตว์ โดยนำส่วนที่เหลือจากการหมัก นำไปตากแห้ง แล้วนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ให้โคและสุกรกินได้ แต่ทั้งนี้ก็มีข้อจำกัด คือ ควรใส่ อยู่ระหว่าง 5-10 กิโลกรัม ต่อส่วนผสมทั้งหมด 100 กิโลกรัม จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตตามปกติและเป็นการลดต้นทุนการผลิต

2.1.7 ชนิดและแบบของบ่อก๊าซชีวภาพ (Biogas Plant)

ชนิดของถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพแบ่งตามสภาพของจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ถังปฏิกรณ์ที่มีเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspended growth)
- 2) ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนวัสดุตัวกลาง (Attached growth)

1) ถังปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย (Suspended growth)

ถังปฏิกรณ์ของระบบประเภทนี้ เชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถังจะอาศัยอยู่ และเจริญเติบโตในสภาพแขวนลอย โดยจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในถังจะมีการกระจายตัวทั่วทั้งถังด้วยการกวนผสมหรือตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นไล่ระดับ (Sludge profile) ไปตามการไหลของน้ำ เช่น ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณด้านล่างถังปฏิกรณ์สูงกว่าด้านบนถังปฏิกรณ์ เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศนั้น เชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าคือพวกเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน ดังนั้นการรักษาเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ให้อยู่ในระบบได้นานเป็นเรื่องที่สำคัญ ซึ่งการรักษาจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบได้นานทำได้โดย

1.1) การมีปริมาตรของเหลวในระบบมาก ทำให้ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) สูง

1.2) การแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำ และวนตะกอนจุลินทรีย์กลับเข้าไปในถังปฏิกรณ์ ซึ่งกรณีนี้ ทำให้ระยะเวลาที่กักเก็บของแข็ง (Solid Retention Time, SRT) นานกว่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (HRT)

1.3) การสร้างให้ตะกอนจุลินทรีย์เกาะตัวกันเป็นเม็ด (granule) และแยกออกจากน้ำได้ง่าย ซึ่งกรณีนี้ทำให้ระยะเวลาที่กักเก็บของแข็ง (SRT) นานกว่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (HRT) เช่นกัน

ตัวอย่างถังบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่มีลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่นิยม โดยเฉพาะเพื่อบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่

- (1) ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ CSTR หรือ ถังแบบ AC
- (2) ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอย UASB
- (3) ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ Anaerobic Covered Lagoon
- (4) ระบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ ABR
- (5) ระบบบ่อแบบราง Plug Flow Anaerobic Digester

โดยรายละเอียดของถังปฏิกรณ์ในกลุ่มจุลินทรีย์แขวนลอย มีดังนี้

(1) ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) และถังแบบ Anaerobic Contact (AC) ถังปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ เป็นถังปฏิกรณ์ที่ของเหลวและของแข็งภายในถังเกิดการกวนผสมอย่างดี วิธีการกวนผสมมักทำโดยการติดตั้งใบกวน ซึ่งใบกวนที่ใช้จะมีรูปทรงต่างๆ เช่น แบบ Paddle แบบ Impeller หรือสกรู (Screw) การติดตั้งใบกวนอาจจะมีทั้งการติดตั้งในแนวตั้ง แนวราบ หรือเอียง อย่างไรก็ตามการกวนด้วยใบกวนนั้นมักจะมีปัญหาเรื่องการบำรุงรักษา ดังนั้นจึงมีการใช้ปั๊มของเหลว หมุนวนหรือการปั๊มก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น วนกลับมาเพื่อช่วยในการกวนผสม ในการหมุนวนน้ำ หรือก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้หัวพ่น (Jet Mixer) มีของการใช้ปั๊มเพื่อหมุนวนของเหลวหรือ ก๊าซเพื่อกวนผสมนี้อาจจะสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการกวนด้วยใบกวน แต่จะช่วยลดปัญหาเรื่องการบำรุงรักษาใบกวนภายในถังปฏิกรณ์ได้ โดยหลักการแล้วการกวนผสมที่เกิดขึ้นทำให้ ภายในถังปฏิกรณ์มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์เท่ากันทั่วทั้งถัง (Completely Mixed) ทำให้มีการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ได้ดี ปฏิกริยาการย่อยสลายจึงเกิดได้ดี

(2) ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอยหรือถังยูเอเอสบี (Up flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) รูปแบบของถังและการทำงานของระบบยูเอเอสบี จะถูกออกแบบให้เชื้อจุลินทรีย์เกิดการยึดเกาะกันเองจนเป็นเม็ดตะกอนที่เรียกว่า Granule ซึ่งลักษณะเม็ดตะกอนที่ดี ควรจะมีความหนาแน่นสูงและมีความสามารถตกตะกอนได้ดี การควบคุมการไหลของน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม จะทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ลอยตัวอยู่เป็นชั้นสัดดีไม่จมลงก้นถังหรือไหลหลุดออกจากระบบ ดังนั้นความเร็วในการป้อนน้ำเสียที่เป็นลักษณะไหลขึ้น (Up flow) ควรจะมีอัตราเร็วสูง (อยู่ในช่วง 0.5-5 เมตร/ชั่วโมง) ซึ่งเป็นระดับที่สามารถทำให้ชั้นสัดดียกตัวขึ้น นอกจากนี้ความเร็วในการป้อนน้ำเสียยังเป็นปัจจัยสำคัญ สำหรับการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีคุณภาพไว้ในระบบและช่วยในการเกิดเม็ดตะกอนอีกด้วย การเก็บรักษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ไว้ภายในถังปฏิกรณ์ไม่ให้หลุดออกจากระบบ (Wash Out) เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำเสียด้วยอุปกรณ์แยกก๊าซชีวภาพ-ของเหลว-ตะกอนจุลินทรีย์ (Gas-Liquid-Solid

Separator หรือเรียกว่า 3 Phase Separator) ที่ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของถังในรูปแบบนี้ ส่วนการกวนผสมภายในถังจะอาศัยการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ จากด้านล่างไหลขึ้นสู่ด้านบนรวมถึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยเช่นกัน

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบ UASB มีดังนี้

(ก) จัดเป็นระบบที่สามารถรับอัตราการรับภาระสารอินทรีย์สูง (High Rate Anaerobic Digestion) โดยสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากถึง 20 kg COD/m³/d

(ข) เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลางจึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถังและเมื่อดตะกอนจะมีอัตราส่วนของจุลินทรีย์ต่อปริมาตรสูง ดังนั้นถังปฏิกรณ์จึงมีขนาดเล็ก รวมทั้งมีระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสั้นกว่าระบบอื่น

(ค) ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุตัวกลาง อุปกรณ์ในการกวนผสมและถังตกตะกอนทำให้ค่าก่อสร้างถังปฏิกรณ์ถูกลง

(ง) เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำ น้ำเสียที่สารอินทรีย์ย่อยสลายง่าย เช่น น้ำเสียจากโรงงานเบียร์ เป็นต้น

(จ) ใช้ระยะเวลานานในการเริ่มต้นระบบ (Start Up) เนื่องจากต้องสร้างเมื่อดตะกอนและชั้นสลัดจ์ก่อน โดยจะต้องทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ถัง UASB ให้มีความเข้มข้นประมาณ 40-100 kg VSS/m³ และรักษาภาวะที่เอื้อให้เกิดการรวมตัวเป็นเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ จึงเป็นเรื่องยากและมีความซับซ้อน

(ฉ) การควบคุมดูแลระบบยุ่งยาก เนื่องจากต้องพยายามรักษาตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสมและไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบ (Wash Out) รวมทั้งปัญหา Mass Transfer Resistance และหากเกิดสภาวะ Shock Load อาจจะมีปัญหาในการลอยตัวของเมื่อดตะกอน และถ้าดำเนินการไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ

(ช) ต้องการบุคลากรที่มีทักษะการควบคุมดูแลระบบสูง

ข้อเสนอแนะ

- อาจจะต้องมีขั้นตอนปรับสภาพก่อนเข้าระบบ (Pretreatment) ถ้ามีของแข็ง แขวนลอยสูง (High Suspended Solid Content) โดยทั่วไปค่าของแข็งแขวนลอยที่เข้าระบบ UASB ควรน้อยกว่า 1,500 mg/l

- โดยทั่วไปอาจจะมีการทำเป็นระบบแบบสองขั้นตอน โดยมีการแยกให้มีบ่อ/ถังหมักกรด (Acid tank) ก่อน แล้วจึงป้อนเข้าสู่ถัง UASB เพื่อผลิตมีเทน

(3) ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Covered Lagoon) ระบบนี้ตัวถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นบ่อดินขุดขนาดใหญ่ โดยปกปิดบ่อควรมีความลึกไม่ต่ำกว่า 6 เมตร และปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกทำด้วย PVC หรือ HDPE ที่ด้านบน เพื่อเก็บกักก๊าซชีวภาพ โดยเก็บก๊าซภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย ตัวผนังและพื้นบ่อดินจะมีการปูพื้นเพื่อป้องกันน้ำเสียปนเปื้อนสู่หน้าดิน องค์ประกอบภายในบ่อทำอย่างไม่ซับซ้อน คือ ประกอบด้วยท่อป้อนน้ำเสีย และท่อที่น้ำเสียไหลออกซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามกัน โดยอาจจะมีรางต่อออกมาจากบ่อเตรียมไว้สำหรับดึงกากตะกอนก็ได้ การก่อสร้างและ

ติดตั้งอุปกรณ์ค่อนข้างง่ายและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับกับระบบอื่น ดังนั้นระบบนี้จึงนิยมใช้หากไม่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่และกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด

ในระบบ Anaerobic Covered Lagoon ท่อป้อนน้ำเสียจะถูกต่อลงด้านล่างของบ่อ ซึ่งบ่อจะมีความลึกประมาณ 3-5 เมตรหรือมากกว่านั้น น้ำเสียที่ป้อนเข้าบ่อเกิดการตกตะกอนบริเวณก้นบ่อรวมทั้งเกิดการย่อยเป็นกรดอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ต่ำกว่าระบบอื่นและบ่อมีขนาดใหญ่ ทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บของระบบค่อนข้างนาน ดังนั้นระบบนี้จึงจัดเป็นระบบที่มีอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ต่ำ (Low Rate Anaerobic Digestion)

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ มีดังนี้

(ก) การก่อสร้างได้ง่าย รวดเร็ว และเงินลงทุนต่ำ

(ข) เหมาะกับน้ำเสียหรือของเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง หรือของเสียที่มีสิ่งที่เป็นพิษเจือปน ซึ่งโดยปกติจะใช้กันในกรณีที่เป็นของเสียจากฟาร์ม น้ำเสียจากเอทานอล เป็นต้น

(ค) ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (โดยเฉพาะของแข็งแขวนลอย)

ข้อจำกัด

(ก) ต้องการพื้นที่ก่อสร้างมากที่สุดในบรรดาระบบผลิตก๊าซชีวภาพทุกประเภท เนื่องจากอัตราการรับภาระสารอินทรีย์เชิงปริมาตรต่ำ

(ข) การกวนผสมไม่ดี เนื่องจากใช้การกวนเป็นไปโดยธรรมชาติ

(ค) การกำจัดตะกอนที่สะสมในบ่อทำได้ยาก

(ง) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบ เช่น ระบบล้มเหลวหรือความเข้มข้นของมีเทนลดลง จะรับรู้ได้ช้า และการแก้ไขระบบกลับมาสู่สภาวะปกติทำได้ช้า

(4) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นกั้นไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Baffle Reactor; ABR) ลักษณะของระบบบำบัด คือ มีแผ่นกั้น (Baffle) ทางกายภาพหรือห้อง เพื่อเป็นการบังคับให้น้ำเสียไหลขึ้นไหลลงตามแผ่นกั้น การออกแบบให้มีแผ่นกั้นมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้มีการกวนผสมเฉพาะในแถวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ ดังนั้นจะทำให้ส่วนห้องต้นทางของบ่อเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังช่วยลดการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ (Wash Out) ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบมีเจริญเติบโตในลักษณะตะกอนแขวนลอย โดยตะกอนของจุลินทรีย์จะลอยขึ้นและจมตัวลง เนื่องจากลักษณะการไหลและก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละห้อง โดยจะเคลื่อนไปตามถังปฏิกรณ์จากทางเข้าไปทางออกของถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราต่ำมากๆ จึงทำให้ถูกกักอยู่ในแต่ละห้องของถังปฏิกรณ์ได้นาน น้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีคุณภาพดี นอกจากนี้บ่อแบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศสามารถที่จะแยกชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปในแต่ละห้อง เช่น ในห้องแรกๆ ของถังปฏิกรณ์จะเป็นกลุ่มที่ผลิตกรด ส่วนห้องท้ายๆ ของถังปฏิกรณ์จะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน โดยทั้งสองกลุ่มมีสภาวะแวดล้อมที่เอื้อต่อการเจริญต่างกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายระบบ Multi-Stage Anaerobic Digestion

จุดเด่นของระบบ ABR

(ก) ไม่เกิดปัญหาการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ (Wash Out) แม้เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญแบบตะกอนแขวนลอยและไม่เป็นเม็ดตะกอน (Granule)

(ข) สามารถลดระยะเวลาการกักเก็บน้ำ (HRT) ได้น้อยเท่าที่ต้องการ โดยที่ระยะเวลาการกักเก็บของแข็ง (SRT) ยังสูงอยู่

(ค) ไม่จำเป็นต้องมีระบบแยก Sludge และ Gas

ข้อจำกัดของระบบ ABR

(ก) ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นและสารแขวนลอยสูง

(ข) กรณีน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH หรือ สารพิษ และปริมาณน้ำเสียที่สูงขึ้น (Volumetric Shock Load) อาจเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในห้องแรกๆ ของบ่อ เป็นเหตุให้ระบบล้มเหลวได้

(5) บ่อแบบราง (Plug Flow Anaerobic Digester) หรือ Channel Digester ลักษณะของระบบบำบัดแบบราง เป็นลักษณะบ่อที่มีการไหลในแนวระดับ (Horizontal flow) ลักษณะทางกายภาพส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนหน้าตัด (ที่ตั้งฉากกับการไหล) ต่อความยาวของบ่อต่ำ เพื่อให้มีการกวนผสมเฉพาะในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำไม่มีผนังกั้นเหมือนกับบ่อแบบ ABR ส่วนห้องต้นทางของบ่อ จะเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ตะกอนของแข็งจะค่อยๆตกลงตามระยะความยาวของบ่อ ซึ่งจะช่วยลดการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ ซึ่งเจริญเติบโตในลักษณะตะกอนแขวนลอยน้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีคุณภาพดี การเคลื่อนที่ของของแข็งและน้ำไม่ได้เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ดังนั้น SRT จึงนานกว่า HRT ซึ่งก็ทำให้สามารถออกแบบบ่อมีขนาดเล็กกว่าถึงปฏิกรณ์แบบกวนผสม โดยทั่วไปบ่อแบบรางจะมีผนังและพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้านบนคลุมด้วยพลาสติกทำด้วย PVC หรือ HDPE เพื่อทำหน้าที่เก็บก๊าซชีวภาพ

จุดเด่นของบ่อแบบราง

(ก) ก่อสร้างง่าย ไม่ต้องมีอุปกรณ์ติดตั้งภายในบ่อ

(ข) ไม่เกิดปัญหาการหลุดออกจากระบบของจุลินทรีย์ (Wash out) ของระบบแม้เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญแบบตะกอนแขวนลอย และไม่เป็นเม็ดตะกอน (granule) มีการควบคุมอายุตะกอนจุลินทรีย์ได้

(ค) ไม่จำเป็นต้องมีระบบแยก Sludge และ Gas

(ง) การดูแลรักษาไม่ยุ่งยาก

(จ) เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูง (TS มากกว่า 10%) หรือไขมันสูง (ไขมัน 1%)

ข้อจำกัดของบ่อแบบราง

(ก) การกวนผสมของบ่อและการกระจายน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับการไหลของน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นในบ่อเท่านั้น

(ข) กรณีน้ำเสียที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เช่น COD, SS, pH หรือ สารพิษ และปริมาณน้ำเสียที่สูงขึ้น (Volumetric Shock Load) อาจเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในบริเวณแรกๆ ของบ่อ เป็นเหตุให้ระบบล้มเหลวได้

2) ถึงปฏิกรณ์ที่เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนวัตถุตัวกลาง (Attached Growth) ระบบนี้พัฒนาตามแนวคิดของ Yong และ McCarty บนแนวคิดที่ว่าประสิทธิภาพของ กระบวนการย่อยสลายแบบ

ไม่ใช้อากาศ มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ (เทียบเท่ากับการมีจุลินทรีย์ปริมาณมากอยู่ในถัง) ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ให้ดียิ่งขึ้น จึงทำการใส่ตัวกลางลงในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะหรือตรึงอยู่บนผิววัสดุของตัวกลางเป็นแผ่นฟิล์มหนา เพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ตัวกลางในถังปฏิกรณ์สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ตามลักษณะที่อยู่ในถัง คือ 1) ตัวกลางที่ถูกยึดติดอยู่กับที่ (Fixed Bed) และ 2) ตัวกลางที่เคลื่อนที่ (Mobile Bed) ในถังปฏิกรณ์ ถังปฏิกรณ์ชนิดที่วัสดุตัวกลางถูกยึดติดอยู่กับที่มีการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ ระบบแบบถังกรอง ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter) และระบบแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Fixed Film) รายละเอียดของระบบดังกล่าวมีดังนี้

(1) ถังกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF) และถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Fixed Film; AFF) การมีวัสดุตัวกลางให้เชื้อจุลินทรีย์ยึดเกาะ จะช่วยให้เก็บรักษาเชื้ออยู่ในระบบได้มาก ซึ่งเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างแน่นอน โดยความแตกต่างของถังปฏิกรณ์ที่วัสดุตัวกลางถูกยึดติดอยู่กับที่ทั้ง 2 รูปแบบดังกล่าว คือ การจัดเรียงตัวกลางในถังปฏิกรณ์ โดยถังกรองแบบไม่ใช้อากาศจะบรรจุตัวกลางในลักษณะสุ่ม (Random Packed) ทำให้ตัวกลางจัดเรียงไม่สม่ำเสมอ ส่วนถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ ออกแบบให้วัสดุตัวกลางจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวกลางที่ต่างกันของถังกรองไร้อากาศและถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ ทำให้ลักษณะการยึดเกาะของจุลินทรีย์ในระบบทั้ง 2 รูปแบบแตกต่างกัน

จุดเด่นของระบบกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF) และถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Fixed Film; AFF)

(ก) มีอัตราการการรับสารอินทรีย์สูง

(ข) จุลินทรีย์ในระบบซึ่งยึดเกาะอยู่บนวัสดุตัวกลางอย่างแน่นหนา ทำให้ไม่หลุดออกนอกถังปฏิกรณ์ได้ง่ายเหมือนระบบจุลินทรีย์แขวนลอย

(ค) ฟิล์มจุลินทรีย์สามารถทนต่อสารพิษได้ดี (Toxicity Resistance)

(ง) Re-startup หรือ Recovery ภายหลังจากที่ระบบล้มเหลวได้เร็ว

ข้อจำกัดของระบบกรองไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Filter; AF) และถังแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Fixed Film; AFF)

(ก) ต้องลงทุนในส่วนของวัสดุตัวกลางเพิ่มมากขึ้น

(ข) ในกรณีของการใส่ตัวกลางแบบสุ่มหรือระบบแบบกรองไม่ใช้อากาศ จะเกิดปัญหาอุดตันได้ง่าย ทำให้เกิดการไหลลัดวงจร

(ค) การเริ่มต้นระบบอาจจะทำได้ช้า เนื่องจากต้องมีการเลี้ยงให้เชื้อจุลินทรีย์ไปติดที่ตัวกลาง

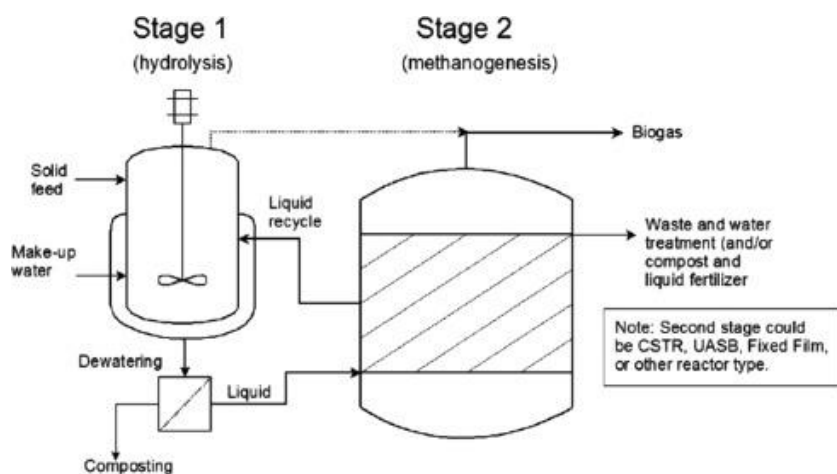
(ง) การตรวจสอบกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ผิวตัวกลางทำได้ยาก ควรมีการเตรียมการช่องสำหรับเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลาง

(2) ถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Anaerobic Fluidized Bed) ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้จะมีตัวกลางขนาดเล็กเพื่อให้จุลินทรีย์ที่เกิดเป็นฟิล์มชีวะยึดเกาะ โดยตัวกลางสามารถเคลื่อนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียตัวกลางเป็น inert เคลื่อนไหวโดยอาศัยแรงยกของน้ำที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทางด้านล่าง ตัวกลางที่นิยมใช้ได้แก่ กรวด แอนทราไซต์ ตัวกลางที่ทำจากพลาสติก เป็นต้น โดยตัวกลางที่ใช้ควรมีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้

จุลินทรีย์ยีสต์เกาะได้ดีและควรมีน้ำหนักเบา เนื่องจากถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด จะต้องใช้พลังงานสูงมากในการทำให้ตัวกลางมีการเคลื่อนไหวลอยอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นในประเทศไทยถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดจึงยังไม่มีนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมจริง

2.1.8 ถังหมักก๊าซชีวภาพไร้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน

สำหรับระบบยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอน หรือ two-stage UASB เป็นระบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในกลุ่มผู้ออกแบบระบบก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยี UASB ในประเทศไทย ระบบยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอนนี้ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การผลิตกรด (จะเกิดขึ้นในปอหมักกรด; Acidification Unit) และ การผลิตมีเทน (เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ ยูเอเอสบี) การทำงานของระบบอาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่ากลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด และแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ซึ่งมีความต้องการที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องของสารอาหาร สภาพทางกายภาพ อัตราการเจริญเติบโต และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการแยกระบบทั้งสองออกจากกันจะช่วยให้ระบบแต่ละขั้นมีประสิทธิภาพดีขึ้น นอกจากนี้ในกรณีที่น้ำเสียมีองค์ประกอบไม่เหมาะสมที่จะเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีโดยตรง เช่น น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ในน้ำเป็นสารประกอบโมเลกุลใหญ่ หรือย่อยสลายช้า การแยกเป็น 2 ระบบเช่นนี้ทำให้ระบบยูเอเอสบี สามารถรับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้นและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น



ภาพที่ 2.3 ถังหมักก๊าซชีวภาพไร้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน

ที่มา: (R. Kothari et.al, 2014)

2.1.9 วัสดุที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพ

อินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ทุกชนิดสามารถใช้เป็นวัสดุหมักก๊าซชีวภาพแต่วัสดุบางชนิดจะมีความเหมาะสมมากกว่าวัสดุบางชนิดด้วยเหตุผลทางด้านต้นทุนและเทคนิคไม่ควรใช้วัสดุที่ต้องซื้อหรือมีราคาแพงเพราะจะทำให้ก๊าซชีวภาพมีต้นทุนสูง ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่สำคัญประการหนึ่งของการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ การเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้จากครัวเรือนและชุมชน ที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เปลี่ยนขยะหรือของเหลือทิ้งเป็นพลังงานที่มีค่านอกจากมูลสัตว์และมูลคนแล้วเศษวัสดุจากพืชก็สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อินทรีย์วัตถุต่างชนิดกันก็จะมีคุณสมบัติทางชีวเคมีที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพต่างกันไป ในการหมักก๊าซชีวภาพสามารถใช้วัสดุหมักหลายชนิดรวมกันได้ แต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยพื้นฐานที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียเมทาโนเจน

คุณลักษณะต่างๆ ของวัสดุหมักซึ่งมีความสำคัญต่อระดับการผลิตก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

C/N Ratio ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนที่มีอยู่ในวัสดุอินทรีย์ จะแสดงอยู่ในรูปของสัดส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน ที่เรียกว่า C/N ratio อัตราส่วน C/N ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 20 - 30 จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหมักแบบไร้อากาศ

1) วัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเสียและมูลสัตว์ที่ได้จากฟาร์มหรือไร่นาเป็นสำคัญ ปัจจุบันนี้เริ่มมีการเติมชีวมวลเพื่อไปช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนที่เติมเข้าไปจะไปเพิ่มปริมาณของธาตุอาหารที่จำเป็นจากการรายงานของกรมมลพิษปี พ.ศ.2544 พบว่าหากขยะมูลฝอยมีสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ง่ายสัดส่วนสูงก็จะเกิดก๊าซมีเทนได้มากโดยอ้างผลจากการศึกษาของงานวิจัย Barlaz ในปี ค.ศ 1987 พบว่าอัตราการเกิด ก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยมีมากขึ้น Combs และคณะ (1988) ได้ศึกษาผลของการแยกขยะมูลฝอยแต่ละประเภทต่อพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักมูลฝอย พบว่าองค์ประกอบที่เน่าเปื่อยได้ง่าย จะทำให้อัตราการเกิดก๊าซมีเทนมีมากขึ้น และมีผลทำให้ได้พลังงานมากขึ้น อนึ่งผลการทบทวนงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาไม่พบการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของ Organic Carbon content หรือ Total organic carbon ต่อสัดส่วนการเกิดก๊าซมีเทน หากพิจารณาปริมาณความชื้นต่อการเกิดก๊าซมีเทนจะพบว่า หากกระบวนการหมักมีความชื้นอยู่ในช่วง 10-15 % จะมีผลกระทบต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์เพราะโดยทั่วไปความชื้นที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วงร้อยละ 60 - 80 จากการรายงานของกรมมลพิษปี พ.ศ.2544 ได้อ้าง ผลงานวิจัยของ Borlaz และคณะ,1987; Kinman, 1987 และ Hartz,1983 พบว่าการเพิ่มความชื้นในมูลฝอยจะทำให้มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนมีเพิ่มขึ้นมาก (www.agro.cmu.ac.th/e_books/602472/E.../ตอนที่%203.doc, 2554)

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วน C/N ของวัสดุอินทรีย์

วัสดุ	C/N ratio
มูลเป็ด	8
มูลคน	8
มูลไก่	10
มูลแพะ	12
มูลหมู	18
มูลแกะ	19
มูลควาย	24
สาหร่ายแกมน้ำเงิน	25
มูลช้าง	43
ฟางข้าวโพด	60
ฟางข้าว	70
ขี้เลื่อย	<200

ที่มา: (คมสัน และคณะ, 2550)

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่ามูลสัตว์โดยเฉพาะมูลวัว ควาย มีค่า C/N เฉลี่ยอยู่ที่ 24 จึงเหมาะที่จะนำมาหมักก๊าซชีวภาพ ในขณะที่มูลคนมีค่า C/N เพียง 8 วัสดุที่มีค่า C/N สูงจะต้องผสมกับวัสดุที่มีค่า C/N ต่ำเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของ C/N อยู่ในระดับที่ต้องการ ตัวอย่าง เช่น บ่อหมักก๊าซชีวภาพในประเทศไทยจะใช้ฟางข้าวใส่ไว้ด้านล่างของบ่อหมักแล้วเททับด้วยมูลคนหรือในประเทศเนปาลจะใช้มูลช้างผสมกับมูลคน เพื่อ ทำให้ได้ค่า C/N อยู่ในระดับสมดุลทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

2) ความเข้มข้นของวัสดุหมัก ก่อนที่จะทำการบ่อนวัสดุหมักเข้าถังหมักมูลสัตว์โดยเฉพาะมูลวัวมูลควายสด จะต้องผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 แต่ถ้าเป็นมูลแห้งจะต้องเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้นเพื่อให้วัสดุหมักมีความเข้มข้นตามที่ต้องการ เช่น 1:1.25 หรือ 1:2 แต่การเติมน้ำต้องไม่ให้มากเกินไป เพราะถ้าเจือจางด้วยน้ำมากเกินไป เนื้อของมูลจะจมลงก้นถัง และถ้าเติมน้ำน้อยไป มูลจะมีความเหนียวมากเกินไปมูลจะไปขวางการไหลของก๊าซที่เกิดขึ้นในส่วนล่างของถังหมัก ในทั้งสองกรณีนี้การผลิตก๊าซจะได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนั้นจะต้องจัดสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น เศษอิฐ เศษหิน ออกก่อน มิฉะนั้นประสิทธิภาพในการหมักจะลดลง (บุญมา และคณะ, 2550)

2.2 ผักตบชวา (Water Hyacinth)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะผักตบชวา

ชื่อพันธุ์	:	(ไทย) ผักตบชวา (อังกฤษ) WaterHyacinth
ชื่อทางวิทยาศาสตร์	:	Eichhornia crassipes (Mart.) Solm
วงศ์	:	Pontederiaceae
ลักษณะ	:	เป็นพืชน้ำลักษณะใบเป็นประเภทใบเดี่ยวลอยน้ำ แผ่นใบกว้างมนโค้ง ก้านใบยาวอวบน้ำ ดอกมีลักษณะเป็น ช่อกลีบดอกสีม่วง ทรงพุ่มกลม สูงประมาณ 50 – 100 เซนติเมตร ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน เจริญเติบโตได้ง่ายทั้งในที่น้ำตื้น น้ำขัง หรือ น้ำมีการไหลถ่ายเทได้ เช่น แม่น้ำลำคลองบึงต่างๆ
ขยายพันธุ์	:	แยกต้นอ่อนที่ปลายไหลไปปลูก และการใช้ Stolon

2.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ผักตบชวา เป็นพืชที่อาศัยอยู่บนผิวน้ำจัดเป็นประเภทลอยน้ำ (Floating Plant) ปกติแล้วรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินหรือโคลนจึงถูกกระแสน้ำพัดไปได้ ในกรณีน้ำตื้นรากจะหยั่งติดกับพื้นดินได้ในบริเวณที่เป็นน้ำลึกจะมีท่อนลอย (Floating Structure) ซึ่งมีหัวรากลอย (Floating Rhizomes) ที่ฐานใบมีกระเปาะภายในมีลักษณะโปร่งพรุนคล้ายฟองน้ำ ลำต้นประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุกมีสีเขียวสูง 5-10 เซนติเมตร ถ้ารากที่ยึดติดกับพื้นดินลำต้นจะสูงขึ้นประมาณ 50 เซนติเมตร การเจริญเติบโตที่เป็นแบบแตกกอ (Sympodial) จะเชื่อมติดต่อกันโดยมีไหล (Stolon) สีน้ำตาลแกมม่วงซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำ ช่วยในการขยายพันธุ์ของผักตบชวาให้เพิ่มจำนวนต้น ผักตบชวาสามารถมีไหลแตกออกไปได้หลายอันเมื่อไหลแตกออกไปก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่ได้ แต่ยังคงติดกับต้นเดิมและเกิดเป็นกอขึ้นใหม่มีรากเกิดขึ้น (กรมชลประทาน, 2550) ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก ประกอบด้วยลำต้นที่มีหัวราก (Rhizomatous system) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 เซนติเมตร และยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ลำต้นมีสีม่วงแดง มีขนาดแตกต่างกัน ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) ก้านใบมีลักษณะกลมพองออก ภายในมีเนื้อพรุนคล้ายฟองน้ำเป็นเครื่องพยุงให้ต้นลอยน้ำได้ ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอย โดยแตกออกจากข้อบนลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10-90 เซนติเมตรมีไหล ซึ่งเกิดตามข้อใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ถ้าน้ำตื้นก็จะหยั่งรากลงดิน และมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึมธาตุอาหารต่างๆ ที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้าลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6-12 ดอก ผักตบชวาจัดเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่

ใช้เพศ (Vegetative propagation) และแบบใช้เพศ (Sexual reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ได้เป็น 2 เท่า ทุกระยะเวลา 62 วันหรือเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้น เป็น 6 แสนต้น ภายในเวลา 8 เดือน สำหรับการขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเอง (Self pollination) แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น

2.2.2 การขยายพันธุ์ของผักตบชวา

ปกติแล้วผักตบชวามีการขยายพันธุ์ได้ 2 วิธี คือการสืบพันธุ์โดยไม่อาศัยเพศ (Asexual Reproduction) โดยการแตกไหลและการสืบพันธุ์โดยอาศัยเพศ (Sexual Reproduction) โดยใช้เมล็ด การขยายพันธุ์ส่วนใหญ่จะงอกไหลออกมาจากต้นแม่ผักตบชวาที่ขยายพันธุ์โดยไม่ใช้เพศ อาศัยการแตกไหลจากต้นแม่แล้วเจริญเติบโตให้ต้นใหม่จะเกิดใบบ่อ่น ในระยะแรกที่โคนด้านในของก้านใบแก่จากต้นแม่และการขยายพันธุ์โดยใช้เพศเมล็ดผักตบชวาที่ลอยอยู่ในความที่ 2-3 เซนติเมตร สามารถงอกแล้วลอยตัวบนผิวน้ำได้ เมล็ดที่อยู่ในดินหรือโคลนสามารถงอกได้เช่นกัน เมื่องอกแล้วรากฝอยจะยึดกับโคลนผักตบชวามีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำตื้นและน้ำเสีย สามารถแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วในสภาวะที่เหมาะสมเช่น อ่างเก็บน้ำสามารถเจริญเติบโตเพิ่มปริมาณได้เป็น 120 ต้น น้ำหนักสดต่อไร่ต่อปี การเพิ่มจำนวนต้นหรือปริมาณน้ำหนักต่อพื้นที่โดยผักตบชวา 1 ต้นในเวลา 2 สัปดาห์ สามารถแตกไหลเพิ่มจำนวนต้นได้เฉลี่ย 12 ต้นต่อตารางเมตร น้ำหนักของผักตบชวาจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 35 เท่า ในแหล่งน้ำที่มีธาตุอาหารอย่างสมบูรณ์มีแสงแดดและอุณหภูมิเหมาะสม ผักตบชวาจะเพิ่มปริมาณขึ้นเป็น 2 เท่าได้ภายใน 7 วัน ผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตสูงมากมีการสะสมชีวมวลได้สูงถึง 20 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน โดยมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดเท่ากับร้อยละ 1.5 ต่อวัน และในน้ำที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยตั้งแต่ 19.2 - 35.5 องศาเซลเซียส จะให้อัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด (Wilson and Rees, 2004)

2.2.3 แหล่งที่พบ

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส และในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 (เปล่งศักดิ์ และภูษจร, 2546) ซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่างๆ ในหลายจังหวัดทั่วประเทศ

2.2.4 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา

โครงสร้างลำต้นผักตบชวาส่วนใหญ่มีความพรุนคล้ายฟองน้ำ ดังนั้นผักตบชวาจึงมีความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีและดูดซึมน้ำได้สูงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา

ลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	0.80-1.20
ความถ่วงจำเพาะ	0.428
ปริมาณความชื้น (%)	8.44
การดูดซึมน้ำ (%)	38.8

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ, 2543.

2.2.5 องค์ประกอบของผักตบชวา

ต้นผักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า ผักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.6 (สุภาพร และปรัชญา, 2542)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติองค์ประกอบของเส้นใยผักตบชวา

องค์ประกอบ	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์
ลิกนิน	12 - 13
เซลลูโลส	43 - 44
เพนโตแซน	14 - 15
ไนโตรเจน	2.8 - 3.5
โซเดียม	1.5 - 2.5
โปแตสเซียม	2.0 - 3.5
แคลเซียม	0.6 - 1.3

ที่มา : (สุภาพรและปรัชญา, 2542)

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางเคมีของผักตบชวาสด

คุณสมบัติทั่วไป	(%)	ปริมาณธาตุอาหาร	(%)
โปรตีน	17.22	คาร์บอน (C)	32 - 35
ไฟเบอร์	15-18	ไนโตรเจน (N)	2.8 - 3.5
ซี้เถ้า	16-20	โพแทสเซียม (K ₂ O)	2.0 - 3.5
ความชื้น	90	แมกนีเซียม (Mg)	0.6 - 1.3
pH	6.85	ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	0.1 - 0.4
		แคลเซียม (Ca)	0.6 - 1.3

ที่มา : (สุภาพรและปรัชญา, 2542)

2.3 กากเบียร์ (Brewer's Grains)

คุณสมบัติของกากเบียร์ เป็นส่วนเหลือจากขั้นตอนแรกของการทำเบียร์ จากการบ่มข้าวบาร์เลย์หรือข้าวมอลต์ ที่สเปรย์น้ำให้เมล็ดงอก จากนั้นจะผ่านขบวนการต้มคั้นน้ำแป้งและน้ำตาลออกเพื่อไปทำเบียร์ ส่วนที่เหลือคือกากมอลต์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กากเบียร์สด ลักษณะเป็นกากอ่อนนุ่ม ซึ่งในสภาพสดจะมีความชื้นสูงประมาณ 70 - 80% กากเบียร์สด จะเก็บไว้ใช้ได้ไม่นาน เมื่อนำไประเหยน้ำออกจะได้กากเบียร์แห้ง เก็บไว้ใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ กากเบียร์ (Brewer's Grains) คือ ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการทำเบียร์ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการสกัดเพื่อนำแป้งและน้ำตาลส่วนใหญ่ออกจากข้าวมอลต์ โดยขบวนการที่ทำให้ธัญพืชเริ่มงอกแล้วเติม น้ำย่อย(เอนไซม์) เพื่อไปย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล (Malting process) ส่วนที่เหลือนี้ยังคงมีสารอาหาร คือ โปรตีนค่อนข้างสูง (ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์)

กากเบียร์เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ ซึ่งคิดเป็น 85 เปอร์เซ็นต์ของเศษเหลือทั้งหมดจากขบวนการผลิตเบียร์ (Tang et al., 2009) ซึ่งมีโปรตีนหยาบ (Crude protein, CP) 24.9 - 34.2 เปอร์เซ็นต์ และพลังงานที่ย่อยได้รวม (Total digestible nutrient; TDN) 71.0-76.9 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณที่สูง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการเสริมในอาหารสัตว์สัตว์เคี้ยวเอื้องเพื่อเพิ่มสมรรถนะการให้ผลผลิต (Westendorf and Wohlt, 2002) ซึ่งลักษณะของกากเบียร์แสดง ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของกากเบียร์ (Brewer's Grains)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมี ดังนี้

กรกนก และคณะ (2560) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนสองขั้นตอนประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตเป็นถังผลิตกรด และตามด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์เป็นถังผลิตก๊าซชีวภาพ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกทำการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการระบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ในการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินเทพณรงค์เพื่อนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพเบื้องต้น ผลการศึกษพบว่า ชุดการทดลองที่ปรับสภาพที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ระยะเวลา 30 นาที ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด คือ 316.19 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 89.71 การทดลองที่สองเป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินสดและไบโกระถินปรับสภาพในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่ได้จากการหมักไบโกระถินที่มีการเติมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักคือ ช่วงที่น้ำหมักกรดมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดในถังปฏิกรณ์ทั้งสองพบว่า ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสดมีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพจะเป็นทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่มีตามธรรมชาติในไบโหมักและเป็นการละลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในไบโหมัก ทำให้สารอาหารและเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ ลิชเบตชุดไบโกระถินปรับสภาพต่ำกว่าชุดไบโกระถินสด และเมื่อนำน้ำหมักกรดของทั้งสองชุดการทดลองมาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ชุดไบโกระถินปรับสภาพและไบโกระถินสดมีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 100.39 และ 152.47 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย ตามลำดับ

กิตติยา ป้อมเงิน(2559) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากผักตบชวาที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่งเป็นเวลา 60 นาที เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการหมักแบบกะ โดยควบคุมปริมาตรรวมที่ใช้หมักเท่ากับ 0.25 ลิตร ใช้ผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนักอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 17.96:1 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 วัน ซึ่งพบว่า การปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างของผักตบชวาและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย โดยหลังการปรับสภาพพบว่ามี เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 41.61, 16.27 และ 12.53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด 175.67 มิลลิลิตร และสูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพโดยมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม 57.00 มิลลิลิตร ในขณะที่การผลิตแก๊สชีวภาพจาก ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 30.87 และ 11.53 ตาม ลำดับ ซึ่งสูงกว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่งร้อยละ 25.40 และ 2.83 ตามลำดับ ร้อยละการกำจัด (% Removal) ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (TVS) ของแข็งคงตัวทั้งหมด (TFS) ค่าซีไอดี และความเป็น กรด-ต่าง เท่ากับ 40.24 45.44 27.11 63,502 และ 7.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าผักตบชวาที่ผ่านการ ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพสูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในช่วง 15 วันแรกของการหมัก

Kafle et al. (2014) ศึกษาผลกระทบอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนในผักกาดหอมจีนภายใต้ช่วงอุณหภูมิ Mesophilic และ Thermophilic โดยมีอัตราของสารตั้งต้นต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ 0.5 1.0 และ 2.0 ในขวดหมักปริมาตร 1.5 L เป็นระยะเวลา 96 วัน พบว่าในช่วงอุณหภูมิ Mesophilic ผลิตปริมาณ ก๊าซชีวภาพได้มากกว่าในช่วงอุณหภูมิ Thermophilic นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อดา เนินการตามอัตราส่วนต่างๆเป็นระยะเวลา 33-35 วัน ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะคงที่และอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่มากที่สุด คือ 0.5 ประมวลร้อยละ 62.8

Wang และคณะ (2014) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้วัตถุดิบหมักแบบร่วมระหว่างเศษอาหารและมูลไก่ ภายในถังหมัก CSTR ขนาด 5 ลิตร และปริมาตรใช้งาน 3.5 ลิตร ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก (35 °C) ดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้เศษอาหารและมูลไก่เป็นวัตถุดิบ จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ โดยเมื่อป้อนของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR) สูงสุดที่ 2.50 kg VS/m.d ให้ค่ามี methane yield สูงสุดเท่ากับ 507.58 ml/g VS และ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 2.11 L/L.d

บุญเกิด เชื้อธรรม (2557) การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาอัตราการป้อนเศษอาหารต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน และเปรียบเทียบปริมาณ ร้อยละของก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักย่อยเศษอาหารกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำเปล่ากับเศษอาหาร 5 อัตราส่วน โดยชุดทดลองเป็นถังหมักแบบสองขั้นตอนประกอบด้วย ถังหมักกรดมีปริมาตร 120 ลิตรและถังหมักก๊าซมี ปริมาตร 200 ลิตรกำหนดชุดทดลองที่ 1 เป็นชุดควบคุม โดยเติมเศษอาหารเข้าระบบครั้งเดียวคือช่วงเริ่ม การทดลองส่วนชุดทดลองที่ 2 ถึง 5 เติมเศษอาหารตามอัตราส่วนอย่างต่อเนื่องทุกวัน กำหนดระยะเวลา ทดลอง 30 วัน วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังเก็บก๊าซและวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วย

เครื่อง Gas Chromatograph วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา คือ ค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำเปล่ากับเศษอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ ชุดทดลองที่ 4 โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 20.56 ลิตรต่อวัน ส่วนชุดทดลองที่ 2 จะมีปริมาณการผลิตน้อยที่สุด มีปริมาณก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 12.36 ลิตรต่อวัน ส่วนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลักทั้ง 5 ชุดทดลอง โดยชุดทดลองที่ 4 มีปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) สูงที่สุด ซึ่งมีปริมาณเฉลี่ย 12.33 ± 3.47

สุพล บ่อคุ้ม (2556) ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกระบบอินทรีย์ (OLR) ของระบบหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมักร่วมกับมูลไก่ใช้เวลาดักเก็บ 28 วัน ในถังปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร(L) ผลการศึกษาพบว่าเกิดก๊าซชีวภาพสะสม 33 วันเท่ากับ 126.09, 211.73 และ 561.63 ลิตร และผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 24.07, 36.18 และ 66.13 L $\text{CH}_4/\text{kg.VS}$ added ตามลำดับ OLR ทั้งสามมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) มีองค์ประกอบมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 61.61 (± 8.03) ได้ผลผลิตมีเทนเป็น 4,855.25, 3,952.93 และ 5,242.73 ลิตรต่อต้นน้ำหนักสดตามลำดับ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1สามารถหมักร่วมกับมูลไก่ด้วยระบบหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้โดยถังสร้างมีเทนมีเสถียรภาพดี

Dechruga *et al.* (2013) ได้รายงานอัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นในการหมักแบบไร้ออกซิเจน เติมนระบบแบบแบคทีเรียเริ่มต้นเป็นหญ้าและขี้หมู ควบคุมที่อุณหภูมิ 35°C ตลอดการทดลองในปริมาตรขวดหมัก 120 ml กวนผสมที่ 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 วัน และมีการใส่ธาตุอาหารหลักและรองลงไปด้วย โดยทำการเปรียบเทียบเชื้อจุลินทรีย์จาก 2 แหล่ง คือ โรงงานผลิตยางและฟาร์มหมูที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นผสมระหว่างหญ้าและขี้หมู ดังนี้ 1 2 3 และ 4 พบว่าที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นผสม 3 และ 4 จะผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด คือ 519.5 ml/gTSa และ 521.9 ml/gTSa ตามลำดับและการใช้เชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มหมูจะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานยาง

Nagao *et al.* (2012) ศึกษาผลของการผลิตก๊าซมีเทนจากเศษอาหาร โดยถังหมักขั้นตอนเดียวแบบ CSTR ปริมาตรใช้งาน 3000 ลิตร ที่สภาวะ mesophilic (37°C) เมื่อป้อนของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบในช่วง 3.7-12.9 kg VS/m.d พบว่าระบบมีความเสถียรแม้ใช้อัตราการป้อนของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ ในปริมาณสูง นั่นคือ 9.2 kg VS/m³.d เมื่อดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 187 วัน โดยที่สามารถลดปริมาณของแข็งระเหยได้ 91.8 เปอร์เซ็นต์ และมี methane yield เท่ากับ 455 ml/g VS

Eskicioglu *et al.* (2011) ได้เปรียบเทียบอัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกากสาพืชที่ช่วงอุณหภูมิ Mesophilic เติมนระบบแบบแบคทีเรียที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น 3.67 1.83 0.92 และ 0.46 gVS/gVS ตามลำดับ ในปริมาตรขวดหมัก 125 ml กวนผสมที่ 90 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 82 วัน พบว่าอัตราส่วนต่างๆ ดังกล่าวไม่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เมื่อเวลาผ่านไป 22 วัน และอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุดร้อยละ 65.4 คืออัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น 0.46 และการย่อยสลายสารอินทรีย์หมดและเริ่มครั้งที่ตั้งแต่วันที่ 15-16 ของการทดลอง

Rene และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศจากการหมักแบบร่วมระหว่างมูลสุกร เศษผลไม้ เศษผัก และของเสียจากโรงฆ่าสัตว์จากปัจจัยของอัตราการป้อนของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR) และสัดส่วนของวัสดุป้อนโดยได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ภายในถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง ขนาดถังหมัก 2 ลิตร และปริมาตรใช้งาน 1.8 ลิตร ดำเนินการภายในอุณหภูมิช่วงปานกลาง (Mesophilic) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และได้ใช้เชื้อเริ่มต้นในการเริ่มต้นเดินระบบ จากการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยน OLR อยู่ในช่วง 0.14 – 0.34 m³/kg Vs โดยควบคุมระยะเวลาการเก็บกักให้คงที่ และได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุป้อนในสัดส่วนต่างๆ ผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อทำการหมักร่วมระหว่างสองวัตถุดิบขึ้นไปจะช่วยให้เพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการหมักเพียงวัตถุดิบเดียว สังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทน

Sosnowski และคณะ (2003) ศึกษาผลของการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนของเสียและขยะเทศบาลที่ได้คัดแยก ที่สภาวะ thermophilic และ mesophilic แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลอง คือ โดยชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ใช้ระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว ในถังหมักขนาด 40 ลิตร โดยในชุดการทดลองแรกใช้ตะกอนของเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสียเทศบาล primary sludge และ activated sludge เป็นสารตั้งต้นหมักที่สภาวะ thermophilic และชุดการทดลองที่ 2 ใช้ตะกอนของเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสีย (75 เปอร์เซ็นต์) ผสมกับขยะเทศบาลที่ได้คัดแยก (25 เปอร์เซ็นต์) การทดลองที่ 3 และ 5 ใช้ระบบสองขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยถังหมักกรดแบบ CSTR ที่สภาวะ thermophilic (56°C) และถังหมักก๊าซที่สภาวะ mesophilic (36°C) โดยในชุดการทดลองที่ 3 ใช้ขยะเทศบาลที่ได้คัดแยกเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ตะกอนของเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสียเทศบาล ชุดการทดลองที่ 5 ใช้ตะกอนของเสียและขยะเทศบาลที่ได้คัดแยกผสมกัน พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนมีมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ในทุกการทดลอง และ biogas productivity มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 และ 0.6 l/g VSS add ซึ่งขึ้นอยู่กับ substrate ที่ใช้และชนิดของถังหมักด้วย