

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีอากาศโดยแบคทีเรียที่ไม่ต้องการอากาศ (Anaerobic Bacterial) ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้ยังมีก๊าซอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่งสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ในขณะที่เดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ องค์ประกอบของน้ำเสีย pH ความเป็นด่าง (Alkalinity) ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) ระยะเวลาพักเก็บตะกอน (SRT) สารพิษ สารอาหาร (Nutrient and Trace Element) (Metcalf and Eddy, 2004 ; Gerardi, 2003) ซึ่งมีผลประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อแบคทีเรียแต่ละกลุ่มซึ่งจะมีหน้าที่ในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ และขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกันไป โดยจะขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์เริ่มต้น

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ส่วนผสม (%)
มีเทน (CH_4)	50-70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	30-50
ก๊าซอื่น	0-8
• ไนโตรเจน (N_2)	
• ไฮโดรเจน (H_2)	
• ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	

ที่มา : Polprasert (1996)

ปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพมีค่าแปรผันตามปริมาณก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ ถ้าก๊าซชีวภาพมีปริมาณมีเทนอยู่ประมาณ 65-70% จะมีค่าความร้อนประมาณ 21-25 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าก๊าซชีวภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนลดลงมาเหลือแค่ประมาณ 50-55% ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจะลดลงเหลือประมาณ 18-20 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังตารางที่ 2-2 ดังนั้นปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือระดับความบริสุทธิ์ของก๊าซชีวภาพ สำหรับก๊าซธรรมชาติมีส่วนผสมของก๊าซมีเทน ก๊าซโพรเพน และก๊าซบิวเทนให้ค่าความร้อนประมาณ 3.73 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Metcalf and Eddy, 2004) เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นได้ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม เป็นต้น จึงทำให้ก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ โดยหากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีขนาดใหญ่ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะสามารถนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (Electric Energy) พลังงานความร้อนโดยใช้เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas Engine) กังหันก๊าซ (Gas Turbine) หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม (Boiler) ส่วนระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีขนาดเล็กระดับชุมชนหรือครัวเรือน ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้สำหรับตะเกียงก๊าซ (Biogas Lamp) เตาหุงต้ม หรือเครื่องปั้มน้ำได้เหมือนก๊าซธรรมชาติ แต่มีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่าน อีกทั้งยังปราศจากควันและเขม่า จึงทำให้สถานที่ที่ใช้ก๊าซนี้มีความสะอาดกว่า สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องมือใดๆ เพียงแต่ปรับสัดส่วนอากาศให้เหมาะสม ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 0.46 กิโลกรัม ถ้าก๊าซหุงต้มราคา 17 บาทต่อหนึ่งกิโลกรัม ก๊าซชีวภาพมีค่า 7.82 บาทต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติก๊าซชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ชนิดของก๊าซ/คุณสมบัติ	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	60%CH ₄ 40%CO ₂	65%CH ₄ 34%CO ₂ 1% อื่นๆ
ค่าความร้อน (KJ)	35.64	-	10.8	22.68	21.6	23.40
สัดส่วนติดไฟในอากาศ (%ในอากาศ)	5-15	-	4-80	4-45	6-12	7.7-23
อุณหภูมิติดไฟ (°C)	650-750	-	585	-	650-750	650-750
ความดันเปลี่ยนสถานะ (bar)	47	75	13	89	75-89	75-89
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (°C)	-82.5	31	-240	100	-82.5	-82.5
ความหนาแน่น (g/L)	0.72	1.98	.09	1.54	1.2	1.15
ความจุความร้อน (KJ/m ³ /°C)	1.6	1.6	1.3	1.4	1.6	1.6

ตารางที่ 2-3 ตารางเปรียบเทียบผลตอบแทนก๊าซชีวภาพแต่ละวิธี

การนำก๊าซชีวภาพใช้งาน	มูลค่าก๊าซชีวภาพ (บาท/ลบ.ม.)
1. แทนน้ำมันเบนซิน (@20บาท/ลิตร) ได้ 0.68 ลิตร	13.60
2. แทนน้ำมันดีเซล (@16บาท/ลิตร) ได้ 0.59 ลิตร	9.44
3. แทนก๊าซหุงต้ม (@17บาท/กก.) ได้ 0.46 กก.	7.82
4. ผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ (@2.3บาท/หน่วย) ได้ 2.086 หน่วย	4.80
5. แทนน้ำมันเตา (@9บาท/ลิตร) ได้ 0.52 ลิตร	4.70
6. ทำความเย็น (@2.3บาท/ตัน) ได้ 1.7 ตัน	3.91
7. ผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันไอน้ำ (@2.30บาท/หน่วย) ได้ 1.20 หน่วย	2.76

ที่มา : <http://www.vcharkarn.com/varticle/41001>

แต่อย่างไรก็ตามพบว่าก๊าซมีเทนจะส่งผลกระทบต่อบรรยากาศมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 24 เท่า (Wuebbles and Hayhoe, 2002) หากปล่อยออกสู่ชั้น

บรรยากาศ ดังนั้นการเผาทำลายก๊าซมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพหรือการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์จึงช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกหรือลดอุณหภูมิความร้อนให้โลก ก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือจุดติดไฟได้ดี ตารางที่ 2-4 แสดงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทนซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับก๊าซมีเทนได้

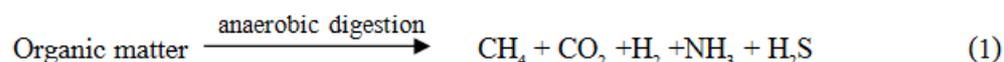
ตารางที่ 2-4 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทน

สูตรเคมี	CH ₄
น้ำหนักโมเลกุล	16.042
จุดเดือดที่ 14.696 psia (760 mm)	-161.49°C
จุดเยือกแข็งที่ 14.696 psia (760 mm)	-182.48°C
ความดันวิกฤต	47.363 Kg/m ³
อุณหภูมิวิกฤต	-82.5°C
ความถ่วงจำเพาะ : ของเหลว °C: -164 °C	0.415
ความถ่วงจำเพาะ : ก๊าซ °C: 25 °C และ 770 mm	0.000658
ปริมาตรจำเพาะ °C : 15.5 °C และ 760 mm	1.47 L/g
ค่าความร้อน °C : 15.5 °C และ 760 mm	38,130.71 KJ/m ³
ความต้องการอากาศสำหรับการเผาไหม้	0.27 m ³
ความสามารถในการติดไฟ	5-15 % โดยปริมาตร
อัตราออกเทน	130
อุณหภูมิการเผาไหม้	650°C
สมการการเผาไหม้	CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O
อัตราส่วน O ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	3.98 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วน O ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	2.00 โดยปริมาตร
อัตราส่วน CO ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	2.74 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วน CO ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	1.00 โดยปริมาตร

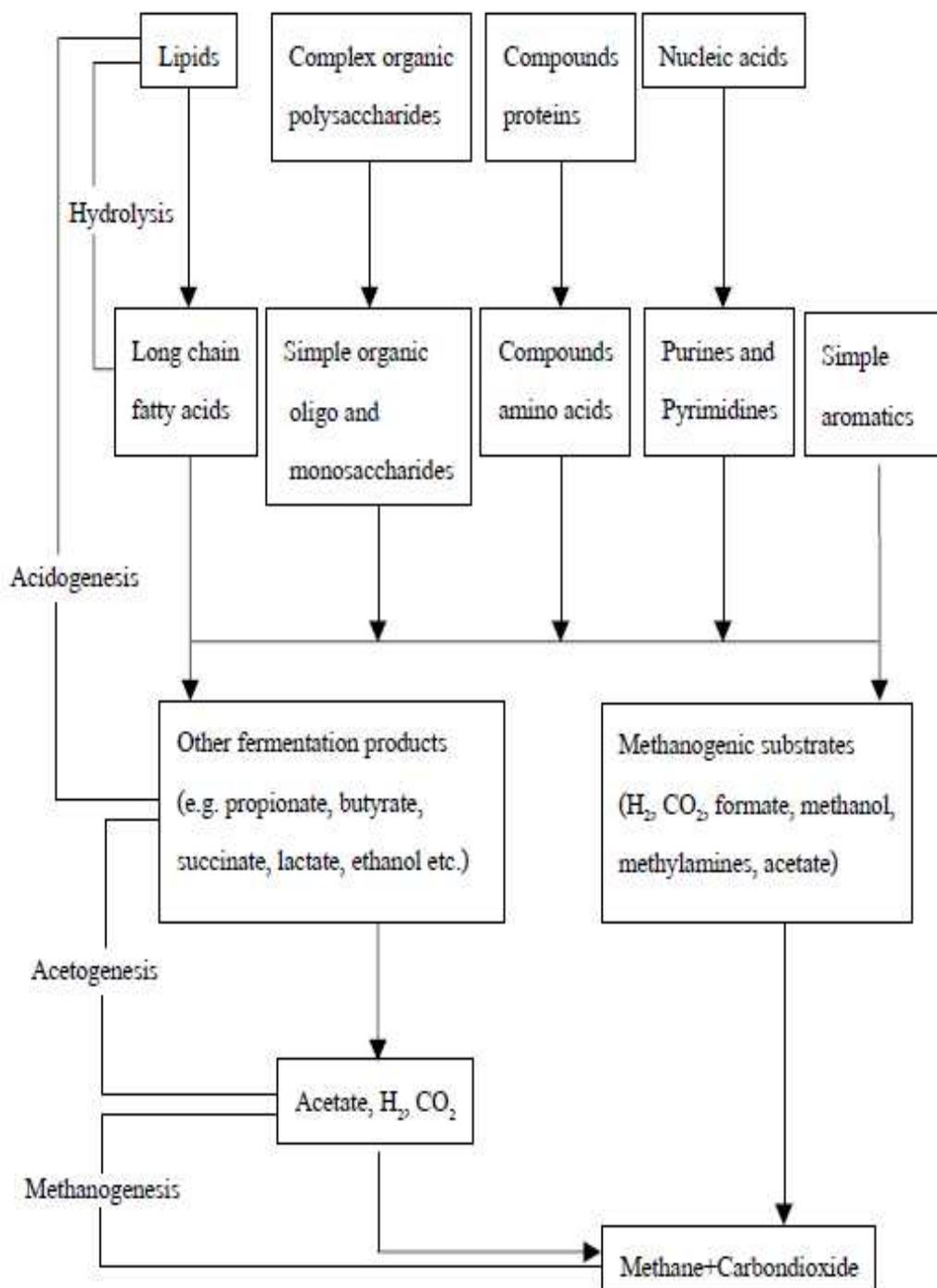
ที่มา : Diaz, 1993

2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศเกิดจากการหมักสารอินทรีย์ โดยที่สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียหลายชนิดเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ แสดงได้ดังสมการ (1) สารอินทรีย์ในวัสดุหมักจะถูกย่อยสลายจากโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อยๆ และมีสภาพคงตัวมากขึ้น



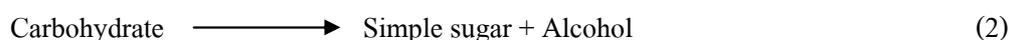
ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียสามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน (John Wiley and Sons, 1994) คือ การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) การอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-1



ภาพประกอบที่ 2-1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ
ที่มา : Holland et al. (1987)

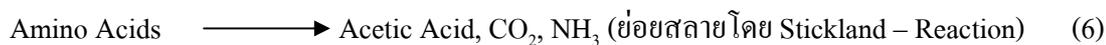
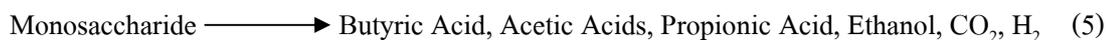
1. กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายพอลิเมอร์ (Polymer Break-Down) การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Complex Organic Compound) ให้กลายเป็นสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวโดยที่ยังไม่มีการลดจำนวนสารอินทรีย์แต่อย่างใด แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้เป็นพวก Hydrolytic Bacteria และ Fermentative Bacteria ผลของปฏิกิริยาจะได้อินทรีย์ประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น การย่อยสลายแป้งซึ่งเป็นสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตให้อยู่ในรูปของน้ำตาลโมเลกุลเล็กกลึงคือน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายโปรตีนให้อยู่ในรูปของกรดอะมิโน และการย่อยสลายไขมันให้อยู่ในรูปของกรดไขมัน เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (2)-(4) โดยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ในตอนแรกจะเป็นพวก Simple Soluble Compound จะถูกทำให้ละลายน้ำและเคลื่อนย้ายเข้าไปในเนื้อเยื่อในเซลล์ต่อไปซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (Extra Cellular Enzyme) ของแบคทีเรียจำพวก Hydrolytic Bacteria ชนิดและปริมาณของแบคทีเรียในถังหมักจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของความเข้มข้นสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อมภายในระบบ เช่น pH และอุณหภูมิ เป็นต้น



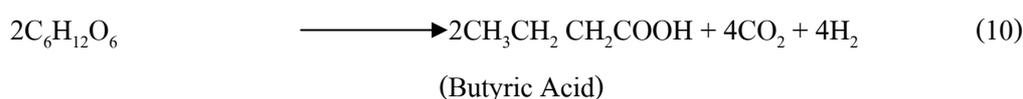
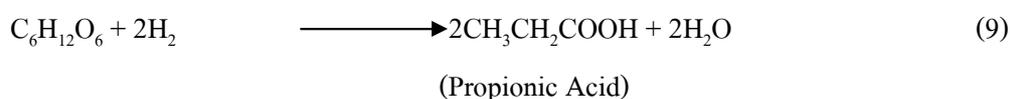
2. กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเดี่ยวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) ดูดซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่เซลล์ และใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ที่มีโมเลกุลคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอมเช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดฟอร์มิก (Formic Acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic Acid) กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) กรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric Acid) และกรดบิวทีริก (Butyric Acid) เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (5)-(7) (Banerjee, *et al.* 1998) นอกจากนี้ยังได้แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย

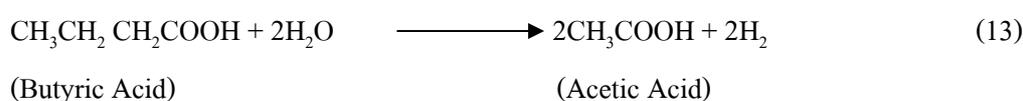
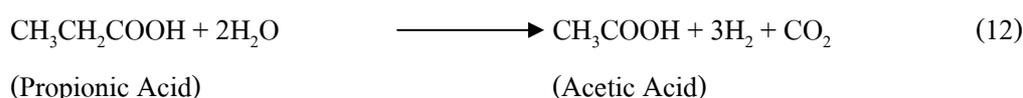
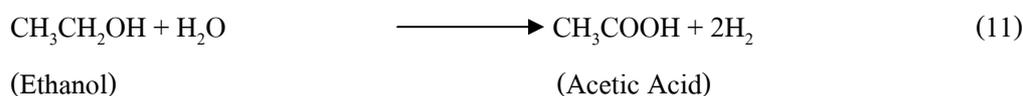


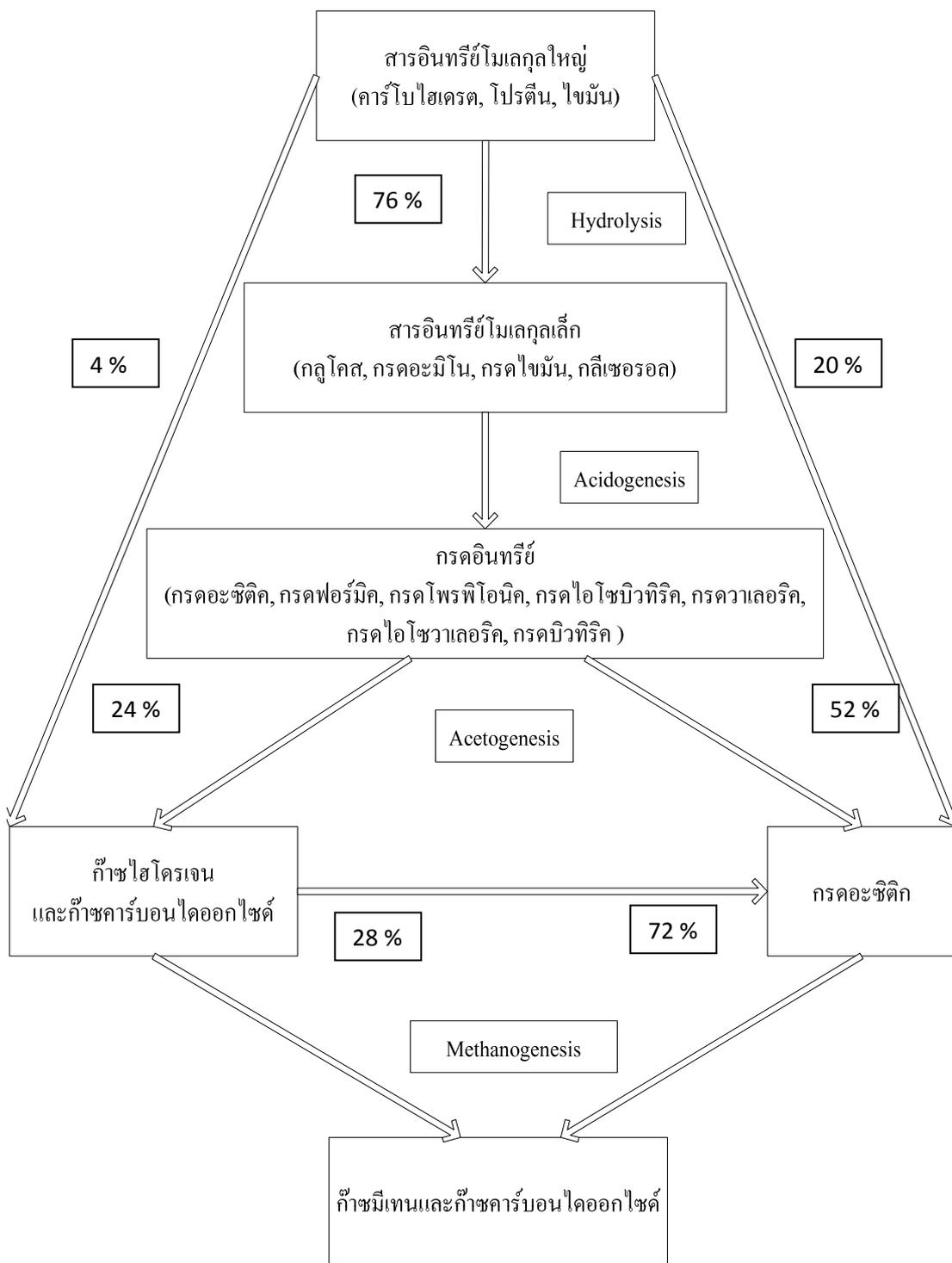
3. อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

อะซิโตเจเนซิสเป็นกระบวนการที่นำกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็กจากกระบวนการอะซิโตเจเนซิสที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม มาเปลี่ยนให้กลายเป็นอะซิเตท (Acetate) ฟอर्मेट (Formate) ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน โดยใช้ Acetogenic Bacteria ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยและไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน ตัวอย่างกระบวนการย่อยสลายกลูโคสไปเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ (Thiele, 1991) แสดงดังสมการ (8)-(10)



ตัวอย่างปฏิกิริยาในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นไปเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน (Gourdon, 1989) แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (11)-(13)





ภาพประกอบที่ 2-2 ขั้นตอนและร้อยละของสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

2.3 เทคโนโลยีการหมักร่วม (Co-Digestion)

การหมักร่วม (Co-Digestion) เป็นกระบวนการหมักร่วมกันระหว่างสองวัตถุดิบหรือมากกว่า กระบวนการหมักแบบไร้อากาศในอดีตจะใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียวในการหมัก ทำให้ได้ผลได้ของมีเทนน้อย (Parawira *et al*, 2004) ในปัจจุบันได้มีการนำวัตถุดิบหลายชนิดมาหมักร่วมกัน หลักเกณฑ์พื้นฐานสำหรับการเลือกวัตถุดิบนั้นจะต้องประกอบไปด้วยวัตถุดิบหลักและวัตถุดิบรอง วัตถุดิบหลักส่วนใหญ่เป็นพวกมูลสัตว์หรือกากตะกอน (Manure, Sewage Sludge) และวัตถุดิบรองเป็นพวกที่มีเส้นใยในปริมาณที่สูง เนื่องจากเส้นใยจะมีสารประกอบพวกเซลลูโลส ในปริมาณที่มากส่งผลให้เกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น (Hong และ David, 2007) แต่สำหรับไบโม่บางชนิดจะไม่เหมาะสมที่จะนำมาหมักร่วม เนื่องจากมีความเป็นพิษในตัวเอง ได้แก่ ไบ Calotropts ซึ่งมีสาร Cardiotomic (Sharma *et al*, 1999) โดยการหมักร่วมช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) และช่วยเพิ่มค่า C/N Ratio ให้สูงขึ้นกว่าการหมักด้วยวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว โดยค่า C/N Ratio มีส่วนช่วยให้ยังยั้งการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนส่วนเกินไปเป็นแอมโมเนียอันเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศอยู่ช่วง 8-23 การหมักร่วมนอกจากช่วยเพิ่มผลได้ของมีเทนในก๊าซชีวภาพ ยังมีข้อดีและข้อจำกัดบางประการแสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการหมักร่วมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ข้อดี	ข้อจำกัด
<ul style="list-style-type: none"> ● ช่วยปรับปรุงความสมดุลของสารอาหารในการหมัก ● ช่วยให้วัตถุดิบเกิดความเข้ากัน ● ช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพ ● ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสีย ● ช่วยเพิ่มปริมาณปุ๋ยที่ได้ ● เป็นการนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ 	<ul style="list-style-type: none"> ● เป็นการเพิ่มค่า COD ที่ปล่อยออก ● เป็นการเพิ่มกระบวนการผลิต ● ขึ้นอยู่กับพื้นที่และปริมาณของชีวมวลที่ใช้ ● ขึ้นอยู่กับราคาของชีวมวลที่ใช้

ที่มา: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/wei.pdf>

2.4 ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ประกอบด้วยการทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่มหลักๆ ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ แบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน (Non Methanogenic Bacteria) และแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) ซึ่งหากมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแบคทีเรียกลุ่มใด ย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานทั้งระบบ ดังนั้น สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมจึงส่งผลต่อการทำงานแบคทีเรีย ซึ่งเป็นกรณีที่บ่งชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของถังหมัก ดังนั้น ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงจะผลิตก๊าซได้มากกว่าระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำสำหรับถังหมักขนาดเท่ากัน หรืออีกนัยหนึ่งถ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้นได้สามารถลดขนาดของถังหมักได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้ ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ประการด้วยกัน คือ องค์ประกอบทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Parameter) และองค์ประกอบทางด้านการทำงานของถังหมัก (Operational Parameter) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-6 (Grady *et al*, 1999)

ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการหมักในสภาวะไร้อากาศ

Environmental Parameters	Operational Parameters
1. pH	1. Raw Materials
2. Alkalinity	2. Physical State of Organic Substance
3. Volatile Acid concentration	3. Mode of Operation
4. Temperature	4. Organic Loading
5. Nutrient Availability	5. Hydraulic Retention Time
6. Toxic Substances	6. Solid Retention Time
7. Mixing	

2.4.1 องค์ประกอบด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Parameter)

1) ความเป็นกรดต่าง (pH) ความเป็นด่าง (Alkalinity) และ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty Acid or VFA)

ปัจจัยนี้มีความสัมพันธ์กัน โดยตรงอย่างเห็นได้ชัดต่อระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยตรง ซึ่ง pH มีส่วนสำคัญต่อระบบเป็นอย่างมากสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ใช้ อากาศและไร้อากาศ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของ pH จะส่งผลโดยตรงกับค่า Alkalinity และ VFA เมื่อค่าของ pH ลดลงปริมาณของ Alkalinity จะลดลงตามไปด้วย ส่วน VFA จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าค่าของ pH เพิ่มขึ้น ปริมาณของ Alkalinity เพิ่มขึ้นและ VFA จะมีค่าลดลง เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของ VFA ภายในระบบเพิ่มขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตก็จะถูก ทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้เป็นสาเหตุทำให้ pH ลดลง

Alkalinity หมายถึง ความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะ ไร้อากาศส่วนใหญ่อยู่ในรูปไบคาร์บอเนต บ่งบอกถึงความสามารถของน้ำหรือของเหลวในการรับ โปรตอน (Proton) ที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และ น้ำ ความเป็นด่างนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรีย (คือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนค่า pH) มีความสำคัญมากต่อการหมักวัสดุที่มีความเป็นกรดสูง ระบบมีความเป็นด่างสูงแสดงถึง ความสามารถรักษาค่า pH ของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ง่าย เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดในระบบความสามารถในการ รักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง โดยทั่วไประบบควรมีสภาพด่างทั้งหมดประมาณ 1,000 – 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปแคลเซียม คาร์บอเนต (Metcalf and Eddy, 2004)

การปรับสภาพความเป็นด่างทำได้ 3 วิธี คือ

1. การเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว โซเดียมไบคาร์บอเนต
2. การใช้วัสดุหมักร่วมกับวัสดุหมักอื่นที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง
3. การนำส่วนที่เป็นสารละลายจากตะกอนที่ออกจากระบบหมักกลับมาใช้อีก

Volatile Fatty Acid หมายถึง การที่สารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน และ คาร์โบไฮเดรต ถูกแบคทีเรียที่เรียกว่า Acid Formers แยกสลายเป็นกรดอินทรีย์ โมเลกุลเล็กๆ หลายๆ ชนิดที่สำคัญ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิอิก (Propionic Acid) แล้วจึงถูกแบคทีเรีย พวก Methane Formers ย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ เกิดขึ้นจากการย่อยสลายในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด การย่อยสลายที่ดีจะต้องมี ความสมดุลของกรดระเหย กล่าวคือ ต้องควบคุมไม่ให้อัตราการเกิดกรดระเหยเร็วกว่าอัตราที่ถูก

เปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน คือ จะต้องมีการระเหยเหลือปรากฏให้วัดได้น้อย เพราะเมื่อกรดนี้เกิดขึ้นมากจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซทันที ดังนั้นการวัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจึงมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบสำหรับระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออัตราส่วนของกรดโพธิโอไนคต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้นเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993) และเมื่อปริมาณ Volatile Acid เพิ่มขึ้นจนเกินไป แสดงว่าระบบเสียสมดุล โดยปกติปริมาณ Volatile Acid ในถังหมักควรมีไม่เกิน 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร ระบบที่ปกติควรมีค่าความเข้มข้นของ Volatile Acid ไม่เกิน 2000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ถ้าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึง 8000-10000 มิลลิกรัม/ลิตร ก็เกิดเป็นพิษขึ้นได้โดยตรงกับระบบ วิธีการแก้พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยการเติมต่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพิ่มระยะเวลาในการหมักวัตถุดิบ หรือมีการหมุนเวียน (Circulate) ของเสียกลับเข้ามาในระบบ

เนื่องจากค่า pH มีความสำคัญต่อการทำงานของแบคทีเรีย ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์และการเจริญที่แตกต่างกันไป ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ต้องรักษาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.5-7.5 (Archer and Kirsop, 1991) ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างกรดจะสามารถเจริญได้ดีในช่วง pH ต่ำประมาณ 4.0-6.0 ส่วนแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนจะเจริญได้ดีในช่วง pH ที่สูงกว่ามีค่าประมาณ 6.5-7.5 แต่ช่วงที่มีความเหมาะสมที่สุดประมาณ 7.0-7.2 ซึ่งเชื้อแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนจะมีความไวต่อค่า pH มากที่สุด ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่า pH จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ถ้า pH มีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพของระบบจะลดน้อยลง และถ้า pH มีค่าต่ำกว่า 6.0 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่สภาวะนี้จะช่วยยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้ใช้กรดอินทรีย์ระเหยไม่ทันทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยถูกสะสมเพิ่มมากขึ้น pH จึงลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว ถ้า pH ลดต่ำลงถึง 4.5 – 5.0 จะทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนหยุดการเจริญเติบโต แต่สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีจำพวกต่างๆ ลงไป เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซดาไฟ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น หรืออาจจะลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบลง ในการใช้ด่างแก้หรือคาร์บอเนตปรับสภาพจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพื่อสร้างด่างไบคาร์บอเนตทำให้ pH เพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาแทนที่ จะทำให้จุดสมดุลเคลื่อนไปจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ใน

บรรยากาศ ซึ่งแต่ละชนิดของแบคทีเรียจะมีระดับ pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. Hydrolytic Bacteria แบคทีเรียประเภทนี้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับ pH ที่เป็นกลางและสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH และสามารถทนได้ถึงระดับ pH ต่ำที่ 4.5

2. Acidogenic Bacteria แบคทีเรียประเภทนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Hydrolytic Bacteria ที่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH ซึ่งสามารถทนได้ถึงระดับ pH ที่ 4.5 แต่โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะเจริญได้ดีที่ระดับ pH ที่เป็นกรดมากกว่า

3. Methanogenic Bacteria แบคทีเรียประเภทนี้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับ pH ที่เป็นกลางเท่านั้น ในช่วง 6.5-7.5 และไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH ถ้าระดับ pH ต่ำกว่า 6.5 หรือมากกว่า 8.0 แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจจะเกิดการหยุดการเจริญเติบโตชั่วคราวและสามารถไหลหลุดออกนอกระบบได้ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะลดลง

2) อุณหภูมิ

อุณหภูมิถือเป็นอีกปัจจัยที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น อัตราการทำปฏิกิริยาของระบบก็จะเร็วขึ้นตามไปด้วย ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส และช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส แต่จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศมีอยู่ 2 ช่วง ได้แก่ 30-35 องศาเซลเซียส ซึ่งแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Mesophilic Bacteria และ 50-60 องศาเซลเซียส ซึ่งแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Thermophilic Bacteria (Kim *et al*, 2002) โดยอุณหภูมิช่วง 40-50 องศาเซลเซียส กลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้ง (Gerardi, 2003) ในช่วง Thermophilic Temperature อัตราเร็วของปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะมากกว่าในช่วง Mesophilic Temperature (Ahn and Forster, 2002) อันส่งผลให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาณด่างหมักลง (Pagilla *et al*, 2000; Zupancic and Ros, 2003) โดยอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วง Thermophilic Temperature จะสูงกว่าอัตราการย่อยสลายที่ช่วง Mesophilic Temperature อยู่ประมาณ 1.9 เท่า (Bryant, 1979) แต่ส่วนใหญ่จะเดินระบบที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส มากกว่า 50-60 องศาเซลเซียส เนื่องจาก

Thermophilic Bacteria มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม ไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมักประสบปัญหาในการควบคุมระบบการผลิตก๊าซได้ง่ายกว่า Mesophilic Bacteria จึงส่งผลให้มีความเสี่ยงในการล้มเหลวของระบบสูง อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบเนื่องจากต้องอาศัยระบบทำความร้อนซึ่งเป็นการยุ่งยากมากและส่งผลโดยตรงกับต้นทุนสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และช่วง Mesophilic Temperature ยังเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่า เนื่องจากสภาพอากาศของประเทศไทยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงนี้ด้วย รายละเอียดกลุ่มแบคทีเรียแสดงในตารางที่ 2-7 และ 2-8 และการเปรียบเทียบการดำเนินระบบระหว่าง Mesophilic Digesters และ Thermophilic Digesters ในตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-7 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน (Gerardi, 2003)

Temperature (°C)	Methane Production
35	Optimum
32-34	Minimum
21-31	Little, digester going "sour"
<21	Nil, digester is "sour"

ตารางที่ 2-8 ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ (Gerardi, 2003)

Feature	Mesophilic Digester	Thermophilic Digester
Loading rates	Lower	Higher
Destruction of pathogens	Lower	Higher
Sensitivity to toxicants	Lower	Higher
Operational costs	Lower	Higher
Temperature control	Less Difficult	More Difficult

ตารางที่ 2-9 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง (Gerardi, 2003)

Bacteria Group	Temperature Range (°C)
Psychrophiles	5-25
Mesophiles	30-35
Thermophiles	50-60
Hyperthermophiles	>65

3) สารอาหาร (Nutrient)

แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศต้องการสารอาหารในการเจริญเติบโตหลายชนิด โดยทั่วไปสารอาหารแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สารอาหารหลัก (Macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ซึ่งมีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจน (N) เป็นสารอาหารสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ฟอสฟอรัส (P) เป็นสารอาหารที่มีส่วนสำคัญสำหรับการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ซัลเฟอร์ (S) และสารอาหารรอง (Micronutrient หรือ Trace Element) ที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) โคบอลต์ (Co) ทองแดง (Cu) และนิกเกิล (Ni) สำหรับหน้าที่ของสารอาหารรองแสดงดังตารางที่ 2-10 ดังนั้นการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมจึงต้องใส่อาหารเสริมให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้น มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปของเสียเป็นมูลที่เกิดจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และจากชุมชนจะจะมีปริมาณธาตุอาหารเหล่านี้สมดุลและเพียงพออยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใดๆ ลงไปในระบบเพื่อหมักก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2-10 ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็นต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ

สารอาหาร	ความเข้มข้น (g/l)	ผล
Fe ²⁺	0.2	ต่อ โครงสร้างฟิล์มชีว (Biofilm) การตกตะกอนของซัลไฟด์
Ni ²⁺	0.01 0.006	สร้าง F ₄₂₀ Co Factor ในพวก Methanogen เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
SO ₄ ²⁻	0.02	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
CO ²⁺	0.03	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์

ที่มา : สุรพล 2530

4) สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials)

สารบางอย่างหากมีปริมาณมากเกินไปในระบบจะส่งผลกระทบต่อการทำงานและการดำรงชีพของแบคทีเรีย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารชนิดต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในระบบด้วย สารเหล่านี้มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ในบางกรณีสารเหล่านี้ก็อาจกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหากมีความเข้มข้นหรือปริมาณที่พอเหมาะ ในระบบการหมักแบบไร้อากาศซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษ ตัวอย่างสารพิษได้แก่

a) ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (Light Metal Cat Ion)

ไอออนประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบหรืออาจเกิดจากการเติมสารเคมีเพื่อปรับ pH ในระบบ ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย ซึ่งความเป็นพิษของมันเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไป ความจำเป็น จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียแสดงดังตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 ความเข้มข้นกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา

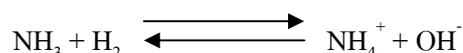
ไอออนประจุบวก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
โซเดียม	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม	75-150	1,000-1,500	3,000

ที่มา : McCarty (1964)

จากตารางจะเห็นได้ว่าแบคทีเรียสามารถทำงานช่วงความเข้มข้นต่ำได้ดีกว่าในช่วงความเข้มข้นที่สูง โดยจะเริ่มเป็นพิษเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น สำหรับมูลสัตว์โดยทั่วไป ปริมาณความเข้มข้นของสารเหล่านี้ยังไม่มากจนเป็นพิษต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม ในการเลี้ยงสัตว์ต่างๆ อาจมีการใช้ยาปฏิชีวนะซึ่งผลตกค้างจะอยู่ในมูลสัตว์ เมื่อนำมูลสัตว์ไปเติมลงในบ่อหมัก อาจจะทำให้แบคทีเรียตายหมดได้ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในเรื่องนี้

b) ก๊าซบางชนิด

ก. แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศ เช่น โปรตีน ยูเรีย เป็นต้น เป็นแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของ แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาขึ้นอยู่กับ pH ดังสมการ



ถ้า pH ต่ำกว่า 7.2 จะมี NH_4^+ มากกว่า แต่ถ้า pH สูงกว่า 7.2 จะมี NH_3 มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่า NH_4^+ แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของ NH_3 จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในรูปของ NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000-9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข. ซัลไฟด์ (Sulfide) ในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศซัลไฟด์สามารถอยู่ได้ทั้งในรูปของสารละลาย หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดขึ้นจากซัลเฟต (Sulfate) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบหรือเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน ซึ่งซัลไฟด์ที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียต้องเป็นซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริกได้ ความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อโลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ดังนั้นการเติมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้ การทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน และอาจทำการเจือจางน้ำเสียหรือทำการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ดังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายขึ้นอยู่กับ pH ของของเหลวและส่วนประกอบของก๊าซ

ค) โลหะหนัก (Heavy Metal) สำหรับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียหรือของเสียอินทรีย์ได้บ่อยและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ไร้อากาศ ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอล โครเมียม นิเกิล เป็นต้น ซึ่งไอออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อแบคทีเรียและพิษของโลหะหนักก็ขึ้นอยู่กับว่าเกลือของโลหะหนักนั้นจะละลายน้ำ ได้มากน้อยเพียงใด และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสียนั้น แสดงดังตารางที่ 2-12 เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ถ้าของเสียนี้อาจมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไป เกลือทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้ แม้ว่าโลหะหนักจะเป็นพิษ แต่โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ตัวอย่างเช่น นิเกิลหรือโคบอลต์ เป็นต้น แต่ต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไป

ตารางที่ 2-12 ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	ยับยั้ง	เป็นพิษ	หยุดทำงาน
Cr(III)	130	260	<200
Cr(VI)	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Ni	10	30	>30
Cd	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1,700

ที่มา : Hayes and Theis (1978)

5) การกวน (Mixing)

การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เป็นการทำให้ของผสมที่อยู่ในระบบผสมกันและเกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึง มีส่วนช่วยในการกระจายความร้อนให้อุณหภูมิเท่ากันตลอด ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับแบคทีเรีย และป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆ ของถังหมัก และทำให้วัตถุดิบภายในถังหมักผสมกันจนมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งเพื่อป้องกันการเกิดตะกอนลอย (Scum) บริเวณส่วนบนของถังหมักด้วย กล่าวโดยสรุปการกวนผสมเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกทางหนึ่งซึ่งจะช่วยให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่การกวนผสมมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอาหารได้ดีจนเกินไป จนอาจเกิดการลดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณที่สูงเกินไปจนส่งผลกระทบต่อการทำงานและการดำรงชีพของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน แต่อย่างไร

ก็ตามการใช้อัตราการกวนน้อยที่สุดจะดีกว่าการกวนแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและการกวนช้าจะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว จำนวนครั้งในการกวนจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการย่อยสลาย กรรมวิธีในการกวนของวัตถุดิบภายในถังหมักมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆ ด้านประกอบกัน วิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น

- 1) ใช้เครื่องสูบลมผ่านท่อ (Pumping Draft Tube)
- 2) ใช้เครื่องกวน (Mechanical Mixing)
- 3) หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม (Recycling of Sludge by Pump)

6) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในสารอินทรีย์และมีความสำคัญต่อการย่อยสลายทางชีววิทยาเป็นอย่างยิ่ง กล่าวคือ คาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียนำไปสร้างเป็น โปรโตพลาสซึมของเซลล์ใหม่และสร้างกำบังบัฟเฟอร์ให้กับระบบ ค่าอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศอยู่ในช่วง 8-23 (อธี, 2546) ถ้าอัตราส่วน C/N มีค่าสูงเกินไป ไนโตรเจนจะมีไม่เพียงพอเนื่องจากถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว ผลคืออัตราการเกิดเซลล์ของแบคทีเรียลดน้อยลง ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณน้อย ในทางกลับกันถ้าหากอัตราส่วน C/N มีค่าต่ำเกินไป ไนโตรเจนจะมีมากเกินไปจนเป็นการทำงานที่เกินของแบคทีเรีย ทำให้เปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางการทำงานของระบบ ดังนั้นการมีแอมโมเนียไนโตรเจนในปริมาณที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อระบบ มูลสัตว์ เช่น มูลวัว มูลสุกร จะเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมในการย่อยสลาย เนื่องจากมีค่าอัตราส่วน C/N เฉลี่ยประมาณ 24 ส่วนพวกพืช เช่น ฟาง ข้าว ขี้เถ้า จะมีอัตราส่วน C/N สูง และสิ่งขบถ่ายของมนุษย์จะมีค่าอัตราส่วน C/N ที่ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 8 สำหรับค่าที่นำมาใช้คำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะเป็นปริมาณคาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนที่ย่อยสลายได้ การปรับสภาพอัตราส่วน C/N ให้กับวัตถุดิบที่ใช้ในการย่อยสลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเติมวัตถุดิบอีกชนิดที่มีอัตราส่วน C/N สูงกว่าหรือเติมไนโตรเจนโดยตรงให้กับวัสดุหมัก

2.4.2 องค์ประกอบทางด้านการทำงานของถังหมัก (Operational Parameter)

1) วัตถุดิบ

สารอินทรีย์ทุกชนิด เช่น มูลสัตว์ชนิดต่างๆ เศษพืชผักผลไม้ต่างๆ ฯลฯ สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพได้ อย่างไรก็ตามความยากง่ายในการหมักหรือปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อหน่วยน้ำหนักของสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับความความยากง่ายในการสลายตัวของสารอินทรีย์ เช่น มูลวัวซึ่งกินหญ้าเป็นอาหารจะมีสารอินทรีย์พวกลิกนินและเซลลูโลสมาก ทำให้ย่อยยาก และมีสารอินทรีย์ที่ย่อยได้เพียง 49% ส่วนมูลสุกรมีสารอินทรีย์พวกแป้งและโปรตีนมาจึงสามารถย่อยสลายได้ง่าย ก๊าซที่เกิดจากการหมักมูลสุกรจึงมีปริมาณมากกว่าเมื่อใช้เวลาในการหมักและปริมาณมูลเท่ากัน

2) สถานะทางกายภาพของอินทรีย์สาร

การย่อยสลายอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศนี้ หากสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้อยู่ในสถานะที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้ง่ายที่สุดจะทำให้ประสิทธิภาพของถังหมักเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนสถานภาพทางกายภาพของสารอินทรีย์ อาจจะทำให้ได้แล้วแต่กรณี เช่น การนำวัตถุดิบมาผ่านการลดขนาดโดยการบด หรือกรณีใช้มูลสัตว์อาจนำมาเจือจางด้วยน้ำให้ปริมาณความเข้มข้นของมูลสัตว์น้อยลงแล้วกรองเอาภาคตะกอนส่วนที่ไม่ละลายน้ำทิ้งไป เหลือแต่ส่วนที่ละลายน้ำเติมลงในบ่อหมัก ซึ่งวิธีนี้นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแล้ว ยังช่วยลดการตกตะกอนของกากมูลในบ่อหมักและการอุดตันตามเส้นท่อต่างๆอีกด้วย

3) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกันทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสีย (Flow Rate) ที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาที่เก็บด้วยถ้าเวลากักพักนานเกินไปจะทำให้การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ และระบบอาจเกิดการล้นเหลวเนื่องจากระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงขึ้น ทำให้ pH ลดต่ำลงตามมา และมีผลต่อการทำงานและการดำรงชีพของแบคทีเรียสร้างมีเทนในที่สุด ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาที่กักพักสั้นเกินไป ความเร็วในการไหลของน้ำจะสูงแบคทีเรียเกิดการหลุดออกจากระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์

แบบไร้อากาศ อยู่ในช่วงประมาณ 1-15 kg VS/m³.d แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบและอัตราการย่อยสลายของแบคทีเรียในระบบ (Barnet, 1978)

4) ระยะเวลาที่กักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT)

ระยะเวลาที่กักเก็บเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ เป็นระยะเวลาทั้งหมดที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบอัตราการย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กักเก็บอินทรีย์สารจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบ (Washout) ในอัตราที่เร็วกว่าแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาที่กักเก็บให้นานขึ้น (Wen *et al*, 1999) ระยะเวลาที่กักเก็บที่เหมาะสมส่งผลให้แบคทีเรียมีปริมาณเพียงพอ นอกจากนี้ระยะเวลาที่กักเก็บจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือ ระยะเวลาที่กักเก็บเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถหาได้โดยการหารปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงไปในแต่ละหน่วยเวลา

ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (Solid retention time, SRT) หมายถึง มวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสีย (SRT=HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสีย (SRT>HRT)

$$HRT = SRT = \frac{\text{Volume}}{\text{FlowRate}} = \frac{V}{Q}$$

2.5 วิธีทำงานของระบบย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาจำแนกตามลักษณะการป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1) การทำงานระบบแบบแบทช์ (Batch Operation)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาเพียงครั้งเดียวให้เต็มระบบในขณะที่เริ่มต้นระบบ (Start Up) หลังจากนั้นจะปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในระบบและจะไม่มีสารอินทรีย์เพิ่มเข้าไปอีก สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนหมดสังเกตได้จากไม่มีก๊าซเกิดขึ้น จึงถ่ายหรือสูบล้างทิ้งไป แล้วเติมสารอินทรีย์เข้าไปใหม่ ระบบนี้เหมาะสมกับวัตถุดิบที่ปริมาณมากๆ แต่นานๆ จึงจะมีสักครั้ง การหมักแบบนี้ประสิทธิภาพไม่ดีนักและเสถียรภาพของระบบไม่คงที่ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

2) การทำงานระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Operation)

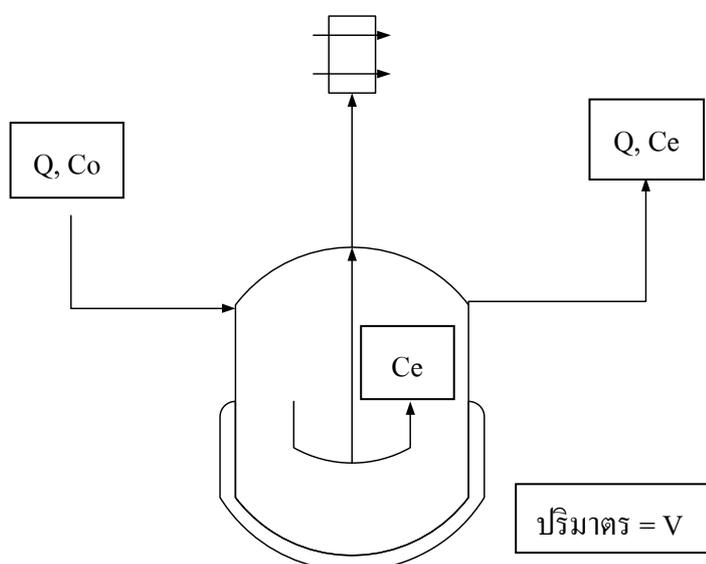
เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาในลักษณะเป็นช่วงๆ แต่สม่ำเสมอ โดยจะมีการป้อนเข้าของสารอินทรีย์และถ่ายวัสดุหมักที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์แล้วออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกริยา เหมาะสำหรับใช้ในกรณีที่มีวัตถุดิบเป็นประจำจะมีท่อสำหรับป้อนวัตถุดิบลงในระบบและท่อสำหรับให้วัตถุดิบเก่าในระบบที่ผ่านการย่อยสลายแล้วไหลล้นออกมาหรือถ่ายทิ้ง ปกติจะเติมสารอินทรีย์ใหม่ทุกวันๆ ละครั้ง การหมักแบบนี้จะส่งผลดีต่อการทำงานของแบคทีเรีย เนื่องจากช่วยให้เกิดสภาวะคงตัว (Steady-State) ของระบบ เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นของสารอาหาร ช่วยลดปัญหาอันเนื่องมาจากการที่สารอาหารเพิ่มเข้าสู่ระบบอย่างกะทันหัน (Shock Load) มีผลทำให้ประสิทธิภาพดีกว่าแบบครั้งคราว ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอใช้ทั่วไป

3) การทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Operation)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา วัสดุหมักจะถูกย่อยสลายภายในระบบหมักหรือถังปฏิกริยาช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบจะสูงที่สุด แต่การเติมวัสดุหมักตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่นั้น อาจทำได้ยากหากไร้อากาศ ดังนั้นในทางปฏิบัติระบบนี้อาจจะมีความยุ่งยาก เมื่อนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กในชนบท

2.6 แบบจำลองของถังปฏิกรณ์ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องที่ใช้ในการวิจัย

ถังปฏิกรณ์ที่ใ้ใช้ในการวิจัยในสภาวะไร้อากาศ เป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมburgh์ชนิดขั้นตอนเดียว (Single Stage Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) ประกอบไปด้วยถังหมักและใบพัดกวน สามารถรองรับวัสดุหมักที่เข้าสู่ระบบอย่างกะทันหันได้ดี แสดงดังภาพประกอบที่ 2-3 เนื่องจากการกวนผสมจะช่วยในการกระจายวัสดุหมักไปทั่วทั้งถังหมัก



ภาพประกอบที่ 2-3 ถังปฏิกรณ์ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2535

เมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 2-3 และคุณมวลสารสามารถวิเคราะห์สมดุลถึงปฏิกิริยาระบบแบบกึ่งต่อเนื่องได้ดังนี้

$$[\text{เข้า}] - [\text{ออก}] \pm \begin{pmatrix} \text{อัตราการเพิ่มหรือลด} \\ \text{มวลสารของตัวทำปฏิกิริยา} \\ \text{เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา} \\ \text{ภายในถังปฏิกรณ์} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{มวลสารของตัวทำปฏิกิริยา} \\ \text{ภายในถังปฏิกรณ์} \end{pmatrix}$$

$$QCo - QCe + r(C)V = \frac{d(CV)}{dt}$$

เมื่อสภาวะภายในถังคงที่

$$\frac{dC}{dt} = 0$$

$$QCo - QCe + r(C)V = 0$$

$$\frac{Q}{V}(Co - Ce) + r(C) = 0$$

$$(Co - Ce) + tr(C) = 0$$

$$r(C) = \frac{(Co - Ce)}{t}$$

เมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Cechi *et al*, 1991)

$$r(C) = -kCe$$

แทนค่า $r(C)$ ลงในสมการ

ดังนั้น สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง จะได้

$$\frac{Co}{Ce} = kt + 1$$

2.7 ระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพ

การออกแบบระบบสำหรับส่วนพักก๊าซชีวภาพจากระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ สำหรับฟาร์มเลี้ยงสัตว์โดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 แบบจำแนกตามลักษณะการกักเก็บ ดังต่อไปนี้ (Metcalf and Eddy, 2004)

1. แบบลอย (Floating Type) จะมีภาชนะคลุมรอบบ่อหมัก โดยภาชนะที่ใช้จะมีน้ำหนักน้อยสามารถเคลื่อนที่ขึ้นได้เมื่อมีก๊าซดันขึ้นไป แบบนี้จะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการผสมกันของอากาศกับก๊าซที่เกิดขึ้น ระบบจะต้องมีท่อก๊าซที่ติดตั้งไว้แล้วเพื่อควบคุมความดัน กรณีมีก๊าซเต็มภาชนะจะมีตัวจุดไฟทำลายก๊าซที่มีมากเกินไป

2. แบบยึดกับที่ (Fixed Type) ภายในบ่อจะมีช่องว่างระหว่างหลังคาของบ่อหมัก และของเหลวในบ่อ เพื่อใช้ในการเก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นมา จากนั้นส่งไปยังส่วนเก็บก๊าซภายนอกบ่อ ภายในช่องว่างมักมีการติดตั้งมิเตอร์วัดความดันก๊าซที่มากเกินไปจะถูกกำจัดโดยการจุดไฟเผาทิ้ง

3. แบบเมมเบรน (Membrane Type) ส่วนที่ใช้คลุมบ่อมีลักษณะเป็นใยสังเคราะห์ที่ยืดหยุ่นได้ สามารถขยายออกไปคล้ายถุงหรือโดมเมื่อมีปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น ระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบนี้เป็นที่นิยมกันทั่วไป เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สะดวกต่อการติดตั้ง ประหยัดค่าใช้จ่ายและง่ายสำหรับการดูแลรักษา

2.8 ข้อดีของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ มีข้อดีหลายประการ ดังต่อไปนี้ (Rao *et al*, 2000)

1. ระบบบำบัดสารอินทรีย์แบบไร้อากาศนี้ไม่ต้องการออกซิเจนเลยซึ่งต่างจากระบบบำบัดแบบมีออกซิเจน ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการให้อากาศกับระบบ
2. สามารถทำงานได้ดี หลังจากที่มีการหยุดทำงานไปชั่วเวลาหนึ่ง โดยไม่ต้องมีการเริ่มเลี้ยงแบคทีเรียใหม่
3. ได้ก๊าซมีเทนมาเป็นแหล่งของพลังงาน
4. สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหามลพิษของเสีย
5. สามารถลดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ โดยการเปลี่ยนให้เป็นพลังงานนำมาใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การหมักร่วมระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

Berna และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศจากการหมักร่วมระหว่าง Cheese whey กับมูลโคในถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้ไบโพดกววนเป็นตัวกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 0.3 รอบต่อนาที ขนาดถังหมัก 26.6 ลิตร และปริมาตรใช้งาน 20 L ไม่ได้ใช้เชื้อเริ่มต้น (Inoculums) ในการเริ่มต้นระบบ ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C และ 34°C โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยของปริมาณของแข็งเริ่มต้นของวัสดุหมัก (% TS) ที่ TS 8% และ TS 10% ที่ระยะเวลาการกักเก็บ (HRT) แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 5, 10, และ 20 วัน ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณของแข็งเริ่มต้น 8 % TS และที่ระยะเวลาการกักเก็บ 5 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด คือ 1.510 m³/m³/d ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนที่ 60 ที่ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดที่ 54% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัด TS และ VS สูงสุดเท่ากับ 49.4% และ 49.5% ตามลำดับที่ระยะเวลาการกักเก็บ 10 วัน และพบว่าปริมาณผลได้ของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการกักเก็บให้มากขึ้นสำหรับปริมาณของแข็งเริ่มต้นที่ TS 8% และ TS 10% ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิ 34°C สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 25°C

Rene และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศจากการหมักแบบร่วมระหว่างมูลสุกร เศษผลไม้ เศษผัก และของเสียจากโรงฆ่าสัตว์จากปัจจัยของอัตราการป้อนของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR) และสัดส่วนของวัสดุป้อนโดยได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ภายในถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ขนาดถังหมัก 2 ลิตร และปริมาตรใช้งาน 1.8 ลิตร ดำเนินการภายในอุณหภูมิช่วงปานกลาง (Mesophilic) ที่อุณหภูมิ 35°C และได้ใช้เชื้อเริ่มต้นในการเริ่มต้นระบบ จากการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยน OLR อยู่ในช่วง 0.14-0.34 m³/kg VS โดยควบคุมระยะเวลาการกักเก็บให้คงที่ และได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุป้อนในสัดส่วนต่างๆ ผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อทำการหมักร่วมระหว่างสองวัตถุดิบขึ้นไปจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นกว่าการหมักเพียงวัตถุดิบเดียว สังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณผลได้ของก๊าซมีเทน

2.9.2 การหมักร่วมโดยใช้ของเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบ

Jewell และคณะ (1993) ได้ศึกษาผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากการเพาะปลูกทางการเกษตร (Crops) มีการศึกษาปัจจัยของปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ โดยพบว่าในระบบหมักที่มีของแข็งต่ำที่ TS 8 - 10 % ระบบจะมีความเหมาะสมที่สุด แต่ถ้าหากในระบบที่มีของแข็งอยู่สูงที่ TS 18 - 35 % พบว่าถ้าปริมาณของแข็งมากขึ้นมีผลให้ระยะเวลาการกักเก็บกาก (SRT) นานขึ้น และทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องมาจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายหรือค่า pH ต่ำ ทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียและการขาดแคลนธาตุอาหารจำพวกธาตุโลหะ การเติมธาตุอาหารและการปรับค่า C/N Ratio ในของแข็งต่ำและของแข็งสูง พบว่าทำให้ระบบมีเสถียรภาพและมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้น จากผลการทดลองในถังหมักที่ใช้วัตถุดิบ 5 กิโลกรัม ที่อัตราการระการรับสารอินทรีย์ 18 g VS/kg/d ทำให้เกิดมีเทน 5.4 l / kg-d และที่อัตราการระการรับสารอินทรีย์ 24 g VS/kg/d ทำให้เกิดมีเทน 7.5 l/kg/d

Radvan และคณะ (1993) ได้ทำการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการหมักแบบแห้ง (Dry digestion) ในสภาวะไร้อากาศ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบด้วย ฟางข้าว และเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นได้จากมูลวัว การทดลองนี้ได้มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อผลได้ของก๊าซชีวภาพ ประกอบไปด้วยการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ศึกษามีดังต่อไปนี้ 22°C, 30°C และ 37°C ปัจจัยของปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) โดย TS ทั้งหมดที่ศึกษามีดังต่อไปนี้ 13- 25% ปัจจัยของเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น โดยทำการทดลองใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากมูลวัว ในช่วง TS 5-15% และปัจจัยของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สูงขึ้นด้วยและพบว่าอุณหภูมิ 37°C ที่ใช้ในการทดลองเหมาะสมที่สุด ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดมีความเหมาะสมที่ TS 21% ผลของเชื้อจุลินทรีย์พบว่าเชื้อจากมูลวัวมากจะทำให้มีปริมาณแบคทีเรียมาก เป็นผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพเร็วขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างจำนวนแบคทีเรียทำให้ค่า pH ต่ำได้ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเกิดก๊าซชีวภาพ การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เป็นการช่วยเพิ่มค่าอัลคาไลน์ (Alkalinity) แต่ถ้าเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมากเกินไปส่งผลให้ค่า pH ลดลงเล็กน้อยซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเกิดก๊าซชีวภาพน้อยลง สภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว คือ TS 21% อุณหภูมิ 37 °C ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากมูลวัว TS 11% และใช้แคลเซียมคาร์บอเนต 2%

2.9.3 การหมักร่วมแบบต่อเนื่อง

Fantozzi และ Buratti (2009) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ โดยใช้สารอาหารที่แตกต่างกัน ในถังหมักแบบต่อเนื่อง (CSTR) ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการหมักที่อุณหภูมิปานกลาง ได้มีการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง การทดลองชุดแรกเป็นการศึกษาปัจจัยของสารอาหารที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยสารอาหารที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ มูลไก่ มูลสุกร และมูลวัว การทดลองชุดที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยส่วนผสมจากสิ่งปลูกจากสัตว์ (มูลไก่และมูลวัว) และชีวมวล (เปลือกมะกอก) ผสมกับแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ (Inocula) ที่แตกต่างกัน โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ คือ ของเหลวในรูเมนจากวัวและกากตะกอนจากฟาร์มสุกร จากผลการทดลองพบว่าการทดลองชุดแรก ส่วนผสมจากมูลสุกรกับมูลไก่ มีปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทนที่ผลิตได้สูงสุดที่สุด มีค่า $0.35 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ และ $0.13 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ การใช้มูลไก่เป็นสารอาหารและการใช้มูลสุกรร่วมกับมูลไก่จะเกิดก๊าซชีวภาพเร็วกว่าการใช้มูลวัวเป็นสารอาหาร การทดลองชุดที่สอง ส่วนผสมจากเปลือกมะกอกกับเชื้อจุลินทรีย์จากกากตะกอนของมูลสุกร มีปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทนที่ผลิตได้สูงสุด มีค่า $0.28 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ และ $0.11 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ ตามลำดับ ส่วนผสมจากมูลไก่กับเชื้อจุลินทรีย์จากกากตะกอนของมูลสุกร มีปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ใกล้เคียงกัน มีค่า $0.22 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ และ $0.11 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ ตามลำดับ

Shanmugam และ Horan (2009) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ ด้วยการหมักแบบร่วมใช้วัตถุดิบจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง (LF) กับขยะชุมชน (MSW) ในถังหมักแบบต่อเนื่อง โดยวัตถุดิบ LF อย่างเดียวไม่เหมาะสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากมีค่า C/N Ratio ต่ำประมาณ 3.2 และมีความเป็นด่างสูง จึงได้ทำการหมักแบบร่วมกับ MSW เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองเพื่อหาค่า pH และค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ลดปริมาณแอมโมเนียที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ เพิ่มผลได้ของก๊าซชีวภาพและผลได้มีเทน การทดลองชุดแรกเป็นการศึกษาปัจจัยของค่า C/N Ratio ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองที่ค่า C/N Ratio แตกต่างกันว่า 5, 10, 15, 20, 30, LF และ MSW จากการทดลองพบว่าค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 15 มีปริมาณผลได้ก๊าซชีวภาพสูงที่สุดมีค่า 87.87 Nm mL/d การทดลองชุดที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยของค่า pH ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองที่ค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 15 ทำการทดลองที่ค่า pH แตกต่างกันว่า 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 และ 8.5 จากการทดลองพบว่าค่า pH มีค่าเท่ากับ 6.5 มีปริมาณผลได้ก๊าซชีวภาพสูงที่สุดมีค่า 170 Nm mL/d ส่วนที่ค่า pH มีค่าเท่ากับ 8.5 จะมีปริมาณแอมโมเนียสูงที่สุดถึง $2,473.06 \text{ mg/L}$ ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของก๊าซชีวภาพมีค่าน้อย ส่วนที่ค่า

pH มีค่าเท่ากับ 4.5 จะมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สูงสุดถึง 26,803 mg/L ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเกิดก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตของก๊าซชีวภาพมีค่าน้อย จากทั้งสองชุดการทดลองพบว่า การหมักร่วมระหว่าง LF กับ MSW ช่วยลดปริมาณแอมโมเนียอันเป็นตัวบ่งชี้การเกิดก๊าซชีวภาพและส่งผลให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น

2.9.4 การหมักร่วมจากชีวมวล

Ali และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผลมะกอก โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากมูลวัว ดำเนินการทดลองในถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิ 37 °C ทำการศึกษาที่ปริมาณ TS 5, 10, และ 15% ตามลำดับ และระยะเวลาการกักเก็บ 10, 20, 30, และ 40 วัน ตามลำดับที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากผลการทดลองพบว่า กากผลมะกอกสามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองคือ ปริมาณ TS 10% ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 20 วัน

Jagadish และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับใบไม้ ถังหมักที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Plug Flow โดยศึกษาปัจจัยของวัตถุดิบตั้งต้น อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ช่วงปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง TS 14-18% ใบไม้ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยใบไม้หลายชนิด ก่อนนำมาใช้ในการทดลองมีการลดขนาดให้อยู่ในช่วง 15-20 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า ถังหมักแบบ Plug Flow สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับใบไม้ได้ มีการกำจัดของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 40-60%

สมฤดี (2551) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับสาหร่ายหนาม ดำเนินการในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบเบทซ์และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการเริ่มต้นระบบ เพื่อที่ศึกษาภาวะที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ สัดส่วนระหว่างวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรกับสาหร่ายหนาม ปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบ อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองคือ ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 2 kg VS/m³.d อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรต่อสาหร่ายหนามที่ 50:50 ซึ่งให้ผลได้การผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.16 mlCH₄/mg VS_{removed}