บทที่ 2

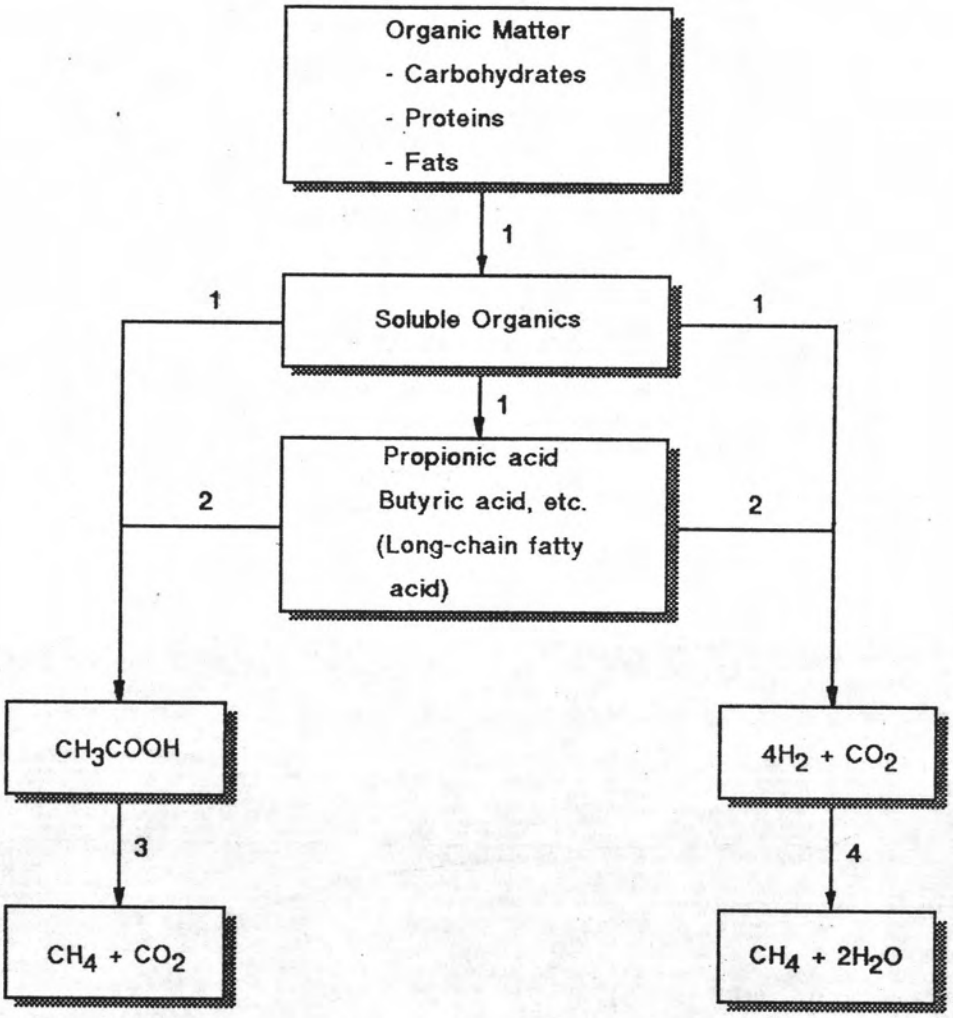
การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการทำงานของแบคทีเรียในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนอิสระ เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนให้เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สสารที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์มีสภาพคงตัวและลดมวลของของแข็งอินทรีย์ ดังนั้นเพื่อให้ระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพ จึงต้องศึกษาให้เข้าใจถึงปฏิกิริยาการทำงานของแบคทีเรีย และปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

จุลชีววิทยาและชีวเคมี

จุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ส่วนใหญ่เป็นพวกแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ ซึ่งสามารถจัดแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มของแบคทีเรียที่ผลิตกรด (Nonmethanogenic bacteria) และกลุ่มของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) นอกจากนี้ยังแบ่งแบคทีเรียออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีกดังแสดงในรูปที่ 2.1 แบคทีเรียแต่ละกลุ่มจะมีการทำงานร่วมกันและต่อเนื่องอย่างสมดุล โดยแบ่งขั้นตอนการย่อยสลายออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (Henze and Harremoes, 1983; Mosey, 1983; Parkin and Owen, 1986)

1. การแตกสลายสารโมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis หรือ Liquefaction) การแตกสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนและอาจอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ เป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญในกระบวนการไร้ออกซิเจน ทั้งนี้เพื่อเปลี่ยนขนาดและรูปร่างโมเลกุลของสารทำให้แบคทีเรียสามารถนำสารอาหารผ่านผนังเซลเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานได้ ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์จะยังไม่คงตัวหรือมีค่าซีโอดีลดลงแต่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ โดยแบคทีเรียจะขับเอนไซม์ออกมาย่อยภายนอกเซล (extracellular หรือ Hydrolytic enzymes)



1 Acid-forming bacteria

2 Acetogenic bacteria

3 Acetoclastic methane bacteria เช่น
Methanosarciva barkeri

4 H_2-utilising methane bacteria เช่น
Methanospirillum hungetai

รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของแบคทีเรียในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Mosey, 1983; Parkin and Owen, 1986)

ผลของการย่อยสลายจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ง่าย เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมันสายยาว เป็นต้น และยังได้กรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น กรดโพพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทิวริก (butyric acid) และกรดอะซิติก (acetic acid) เป็นต้น

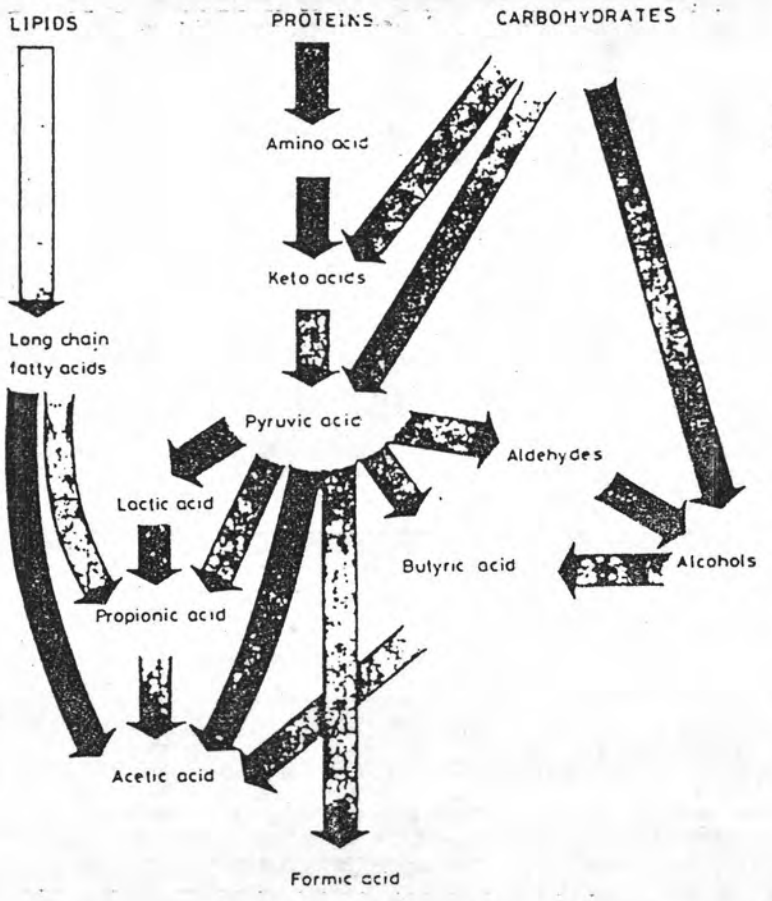
2. การผลิตกรด (Acid Production) สารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงนี้จะถูกย่อยต่อโดยกลุ่มของแบคทีเรียที่สร้างกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงเป็นกรดอินทรีย์อย่างง่ายที่สำคัญได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) ที่ใช้เป็นสารอาหารสำหรับขั้นตอนต่อไป กรดโพพิโอนิก (propionic acid) และกรดบิวทิวริก (butyric acid) จะถูกสร้างขึ้นมาเช่นกัน แต่แบคทีเรียกลุ่ม Acetogenic bacteria ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์ทั้งสองให้เป็นกรดอะซิติก ดังสมการข้างล่าง

$$CH_3CH_2COOH \text{ (propionic)} + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad (2.1)$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH \text{ (butyric)} + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \quad (2.2)$$

Henze and Harremoes (1982) ได้แสดงปฏิกิริยาที่เกิดจากการทำงานโดยกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตกรดดังรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ในขั้นตอน การย่อยสลายพวกโปรตีนและกรดอะมิโน ทำให้มีแอมโมเนียถูกปลดปล่อยออกมาด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าไม่สูงจนเป็นพิษต่อปฏิกิริยาการหมักได้ แต่ถ้าป้อนของเสียในอัตราสูงและมีไนโตรเจนอยู่มาก การยับยั้งโดยแอมโมเนียก็อาจเกิดขึ้นได้

3. การผลิตก๊าซมีเทน (Methane Formation) ของเสียถูกทำให้คงตัวในขั้นตอนนี้โดยการเปลี่ยนกรดอะซิติกให้เป็นก๊าซมีเทน ซึ่งจะไม่ละลายน้ำและแพร่ออกไปจากระบบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก็เช่นกันอาจจะแพร่ออกจากระบบ หรืออาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของด่างไบคาร์บอเนต การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเกิดได้ช้าเนื่องจากกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน (methanogenic bacteria) มีการเจริญเติบโตช้า สามารถเจริญได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (obligate anaerobic bacteria) มีความไวต่อค่าพีเอช และมีจำนวนประชากรที่ต่ำ (Dague, 1968) ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนจำกัดของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งในขั้นตอนคือ มีสารอาหารบางอย่างเท่านั้นที่แบคทีเรีย



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตกรดของแบคทีเรีย (Henze and Harremoes, 1982)

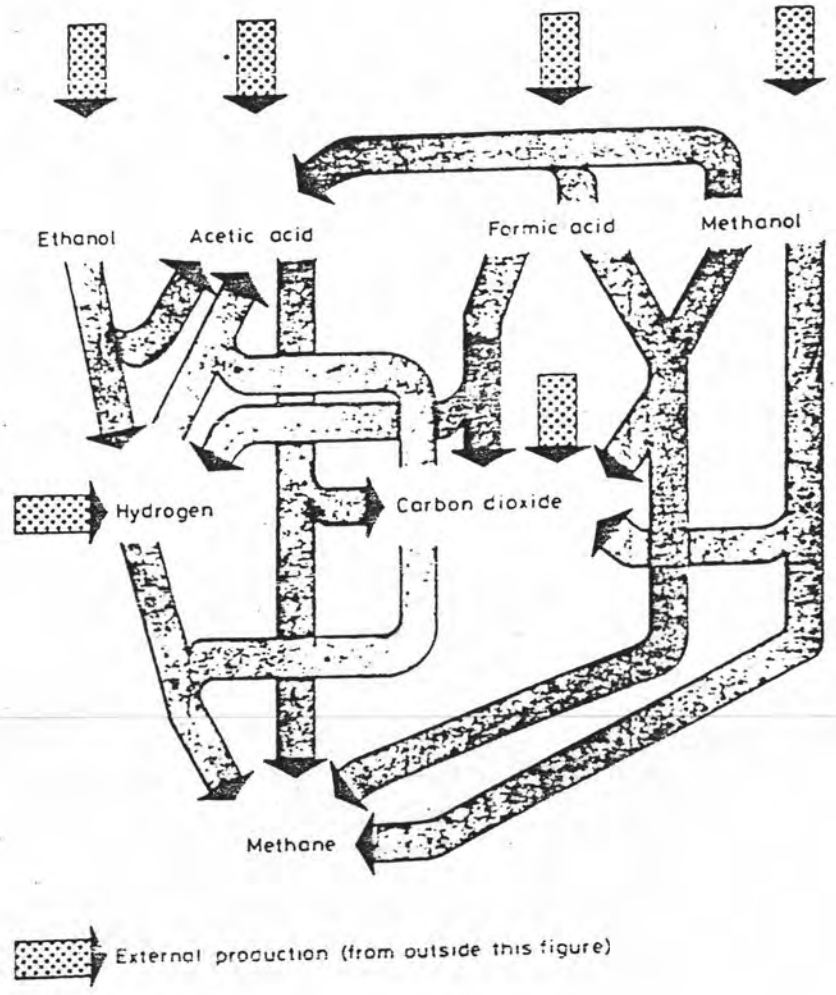
สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานได้ ซึ่งได้แก่ กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดอะซิติก (acetic acid) เมทานอล (methanol) เอธานอล (ethanol) และก๊าซไฮโดรเจน (Buswell and Mueller, 1952; Mah, Smith and Baresi, 1978) สารอาหารที่สำคัญที่สุดในขั้นตอนนี้ได้แก่ กรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน โดย 70 เปอร์เซ็นต์ของการผลิตก๊าซมีเทนได้จากกรดอะซิติก (Jeris and McCarty, 1965)

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \qquad (2.3)$$

ที่เหลือประมาณ 1ใน 3 เป็นผลจากการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน โดยการทำงานของ Hydrogen-utilising methane bacteria

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad (2.4)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดจากการทำงานโดยกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตก๊าซของแบคทีเรีย (Henze and Harremoes, 1982)

ปัจจัยที่มีผลต่อระบบ

ในการออกแบบและการควบคุมการทำงานของระบบแบบไร้ออกซิเจนนั้น ลักษณะทางจุลชีววิทยาจะเป็นลักษณะที่มีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากการออกแบบต้องทำให้แบคทีเรียมีจำนวนของประชากรมากและคงที่ รวมทั้งทำให้การทำงานดำเนินไปอย่างเหมาะสม เพื่อที่การย่อยสลายสารอินทรีย์จะได้มีประสิทธิภาพ และเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในระบบ ก็อาจจะมีผลทำให้ระบบล้มเหลวได้ การออกแบบหรือปรับเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างดีนั้น จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งปัจจัยหลักที่สำคัญมี 2 ประการ คือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factors) และปัจจัยทางด้านการทำงาน (operational factors) ปัจจัยหลักทั้งสองด้านนั้นยังแบ่งย่อยเป็นตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้ (Dague, 1968; Owen, 1982)

1. ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม
   - 1.1 อุณหภูมิ (Temperature)
   - 1.2 พีเอช (pH)
   - 1.3 สภาพด่าง (Alkalinity)
   - 1.4 สารอาหาร (Nutrient availability)
   - 1.5 สารพิษ (Toxic materials)

2. ปัจจัยทางด้านการทำงาน
   - 2.1 ระยะเวลาเก็บกัก (Retention time)
   - 2.2 ลักษณะของสารอาหาร (sustrate characteristics)
   - 2.3 การผสม (Mixing)

1. ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม

1.1 อุณหภูมิ (Temperature) ปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด 2 ช่วงอุณหภูมิคือ ช่วง Mesophiles ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียสและช่วง Thermophiles ที่ชอบอุณหภูมิในช่วง 50-65 องศาเซลเซียส อัตราการผลิตก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่ม แต่จะลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส (Polprasert, 1989)

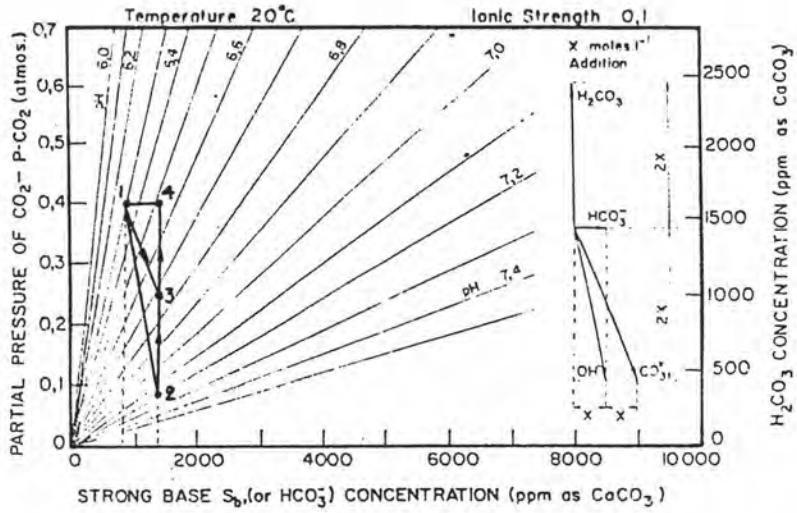
1.2 พีเอช (pH) เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงช้าเนื่องจากมีบัฟเฟอร์ในระบบ การรักษาค่าพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้การหมักมีประสิทธิภาพและทำให้แบคทีเรียในระบบยังทำงานอยู่ได้ โดยทั่วไปแล้วระบบจะทำงานได้ดี พีเอชต้องอยู่ในช่วง 6.5-7.6 (McCarty, 1964 part I) แต่ผลการทดลองของสมชาย (2530) พบว่าที่พีเอช 5.6 ยังมีการผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้น แต่จากการศึกษาของ Etzel และ Pohland (1960) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดระเหยโดยเฉพาะกรดอะซิติคเพิ่ม จะมีผลทำให้พีเอชลดลงและปริมาณก๊าซลดลง Dague (1968) ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับปริมาณกรดระเหยง่าย สภาพด่าง และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ในถังหมัก (ตารางที่ 2.1) จากการศึกษาของ Dague, Hopkins และ Tonn (1970) พบว่า ที่ปริมาณกรดระเหย 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 6.5 การผลิตก๊าซมีเทนจะเป็นศูนย์ แต่ที่พีเอชเท่ากับ 7 จะมีก๊าซเกิดขึ้น 2,240 ลูกบาศ์กเมตรต่อวัน และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดระเหยเป็น 7,200 มิลลิกรัมต่อลิตร การผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น 3,080 ลูกบาศ์ก์เมตรต่อวัน แต่กรดระเหยจะเป็นตัวทำลายระบบบัฟเฟอร์ทำให้พีเอชน้อยกว่า 6.5 นั่นแสดงให้เห็นว่าถ้าระบบบัฟเฟอร์ที่มีอยู่ภายในไม่เพียงพอที่จะสามารถควบคุมพีเอชได้แล้ว ค่าพีเอชก็จะลดลงและทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลงหรือระบบหยุดชงักได้ ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้น การรักษาสภาพของระบบให้เหมาะสมทำโดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง

สารเคมีที่ช่วยในการเพิ่มค่าพีเอชให้แก่ระบบ ได้แก่ ด่างแก่ คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และกรดคาร์บอนิก เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (CaO) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เป็นต้น การใช้ด่างแก่หรือคาร์บอเนตจะทำ

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพีเอช (Dague, 1968)

ปัจจัย	การเปลี่ยนแปลง	ผลต่อค่าพีเอช
กรดระเหยง่าย (volatile acid)	เพิ่ม ลด	ลดลง เพิ่มขึ้น
สภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต (bicarbonate alkalinity)	เพิ่ม ลด	เพิ่มขึ้น ลดลง
เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ในถังหมัก ($\%CO_2$)	เพิ่ม ลด	ลดลง เพิ่มขึ้น

CO_2 ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจาก CO_2 ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทน CO_2 ในน้ำเพื่อสร้างด่างไบคาร์บอเนตทำให้พีเอชเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียผลิตก๊าซ CO_2 มาแทนที่ จุดสมดุลก็จะเคลื่อนจนกระทั่ง CO_2 ที่ละลายน้ำสมดุลกับ CO_2 ในบรรยากาศ ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 2.4 ถ้าสภาวะเริ่มต้นของระบบอยู่ที่ 1 การเติม NaOH หรือ $Ca(OH)_2$ จะทำให้จุดเลื่อนไปที่ 2 แต่เมื่อแบคทีเรียผลิตก๊าซ CO_2 ขึ้นใหม่ ทำให้ความดันบรรยากาศของ CO_2 อยู่ที่ระดับเดิม จุดเลื่อนไปที่ 4 พีเอชก็จะลดลงทั้งที่สภาพด่างไบคาร์บอเนตยังคงเดิม แต่สำหรับการเติม $NaHCO_3$ แล้ว จุดสมดุลจะเลื่อนจาก 1 ไป 4 โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซ CO_2 ไม่ถูกใช้เพื่อสร้างด่างไบคาร์บอเนต



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ สภาพด่างไบคาร์บอเนต และพีเอช ในช่วงพีเอช 6.0-7.5 (Capri and Marais, 1975)

1.3 สภาพด่าง (Alkalinity) มีความสำคัญคือเป็นบัฟเฟอร์ช่วยควบคุมพีเอชให้แก่ระบบ ในการหมักแบบไร้ออกซิเจน สภาพด่างทั้งหมดจะมีความสำคัญน้อยกว่าสภาพด่างที่อยู่ในรูปไบคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพด่างทั้งหมดจะน้อยกว่า สภาพด่างไบคาร์บอเนตเมื่อมีปริมาณของกรดเพิ่มขึ้น โดยสภาพสภาพด่างไบคาร์บอเนตจะถูกทำลายและแทนที่ด้วย สภาพด่างวีเอฟเอ (VFA alkalinity) ดังสมการที่ 2.5-2.7

$$HCO_3^- + CH_3COOH \longrightarrow CH_3COO^- + H_2CO_3 \qquad (2.5)$$

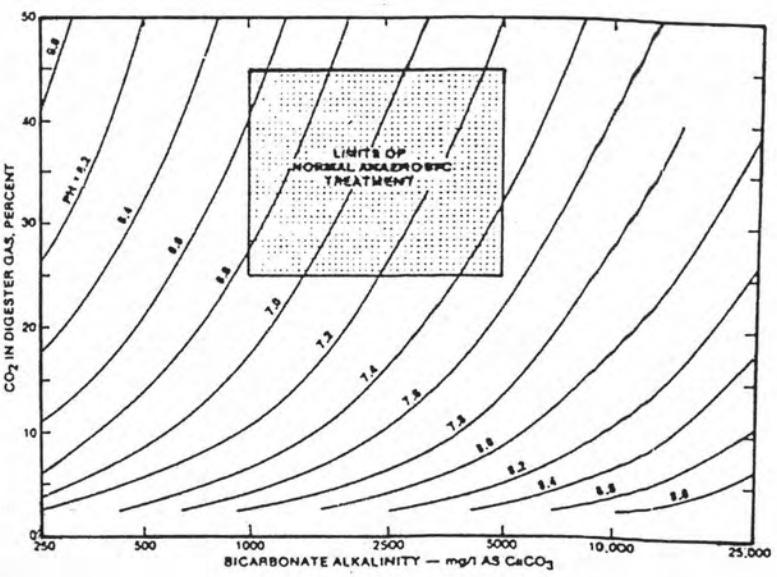
$$H_2CO_3 \longrightarrow CO_2 + H_2O \qquad (2.6)$$

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad (2.7)$$

สภาพด่างไบคาร์บอเนตเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง แอมโมเนีย กับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้เป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (ammonium bicarbonate) ดังสมาการที่ 2.8

$$\begin{array}{cccccc} NH_4^+ & + & OH^- & + & H^+ & + & HCO_3^- \\ \uparrow & & \downarrow & & \uparrow & & \downarrow \\ (NH_3 & + & H_2O) & & (CO_2 & + & H_2O) \end{array} \rightleftharpoons NH_4^+ + HCO_3^- + H_2O \qquad (2.8)$$

McCarty (1964 part I) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและสภาพด่างไบคาร์บอเนต (รูปที่ 2.5) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาพด่างไบคาร์บอเนตของระบบไม่ควร



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพด่างไบคาร์บอเนต เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพีเอชในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (McCarty, 1964 part I)

มีค่าต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$ โดยในการหาค่าสภาพเป็นด่างไบคาร์บอเนต ต้องทราบค่าความเข้มข้นของกรดระเหยง่าย และสภาพด่างทั้งหมด แล้วจึงนำมาคำนวณหาจากสมการ 2.9 (McCarty, 1964 part II)

$$BA = TA - (0.85)(0.833)TVA \qquad (2.9)$$

โดย BA = ปริมาณสภาพด่างไบคาร์บอเนต, มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$

TA = ปริมาณสภาพด่างทั้งหมด, มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป $CaCO_3$

TVA = ปริมาณกรดระเหยง่าย, มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป CH_3COOH

0.833 = น้ำหนักสมมูลย์ของ $CaCO_3$ / น้ำหนักสมมูลย์ของ CH_3COOH

0.85 = 85 เปอร์เซ็นต์ของสภาพด่างวีเอฟเอ วัดได้จากการไตเตรทสภาพด่างทั้งหมด

แต่สภาพด่างเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถชี้ปัญหาของระบบได้ทั้งหมด ต้องเปรียบเทียบกับกรดระเหยง่าย โดยอัตราส่วนของปริมาณกรดระเหยง่ายต่อสภาพด่างไบคาร์บอเนต ที่มีค่าน้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้ามีค่าสูงกว่า 0.8 แล้ว ระบบกำลังอยู่ในขั้นที่พีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็ว

1.4 สารอาหาร (Nutrients) ในการเพิ่มการผลิตก๊าซต้องให้สารอาหารที่มีคาร์บอนและไนโตรเจนอย่างเพียงพอ โดยทั่วไปแล้วการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ต้องการสารอาหารในอัตราส่วน BOD:N:P เพียง 100:1.1:0.2 ซึ่งต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจนที่ต้องการในอัตราส่วน 100:5:1 และในการรักษาระบบมิให้ล้มเหลวลงจำเป็นต้องมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) อย่างน้อย 0.062 (Sanders and Bloodgood, 1965) ถ้ามีอัตราที่สูงเกินไประบบก็จะถูกจำกัดเนื่องจากขาดไนโตรเจนที่จะใช้ แต่ถ้ามีในอัตราที่ต่ำเกิน แอมโมเนียก็จะมีปริมาณมากจนเกิดความเป็นพิษได้ นอกเหนือจากสารอาหารหลักแล้ว อิออนบวกของธาตุบางชนิดเมื่อมีความเข้มข้นในปริมาณที่เหมาะสมก็เป็นอาหารเสริมที่จำเป็น เพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นที่มีผลกระตุ้นและเป็นพิษของอิออนบวกอัลคาไลและอัลคาไลเอิร์ธ (McCarty, 1964 part III)

อิออน	ความเข้มข้น (มก./ล)		
	กระตุ้น	มีพิษ	พิษรุนแรง
โซเดียม	100-200	3,500-5,500	8,000
โปตัสเซียม	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม	75-100	1,000-1,500	3,000

019179

1.5 สารพิษ (Toxic Materials) ในระบบถังหมักจะมีสารต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องมากมาย สารบางอย่างจะเป็นตัวช่วยให้การทำงานของระบบดีขึ้นหรือดำเนินต่อไปได้ด้วยดี แต่ก็มีสารบางตัวที่มีผลยับยั้งระบบเมื่อมีความเข้มข้นที่สูงเกินไป มาลี วิศวาจารย์ (2531) ได้แบ่งสารพิษออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ พิษของสารอินทรีย์ ได้แก่ อัลกอฮอล์ กรดไขมันสายยาว คลอโรฟอร์ม และกรดระเหยง่าย เป็นต้น พิษของก๊าซ ได้แก่ แอมโมเนีย และไฮโดรเจนซัลไฟด์ พิษของโลหะหนักได้แก่ ทองแดง นิกเกิล แคดเมี่ยม โครเมี่ยม สังกะสี ตะกั่ว และปรอท เป็นต้น และพิษของเกลืออนินทรีย์ ซึ่งเป็นอิออนของธาตุในกลุ่มอัลคาไล (alkali) และอัลคาไลเอิร์ธ (alkaline-earth) เช่น โซเดียม โปตัสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น ความเป็นพิษของสารต่าง ๆ เหล่านี้ จะขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นที่มีอยู่ในระบบ ซึ่ง Polprasert (1989) อ้างจาก EPA (1979) ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.3

นอกจากสารพิษกลุ่มต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้น ในมูลฝอยของชุมชนยังน่าจะมีสารพิษอีกชนิดหนึ่งที่ปนเปื้อนรวมอยู่ด้วยคือ สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืช (pesticide) การปนเปื้อนของสารพิษดังกล่าว อาจมาจากการใช้สารดังกล่าวภายในบ้านเรือนเพื่อกำจัดแมลงหรือสัตว์รบกวนรวมทั้งการทิ้งภาชนะที่บรรจุปนกับขยะอื่น สารป้องกันและกำจัดแมลงที่นิยมใช้กันตามบ้านเรือนมักเป็นสารประกอบในกลุ่มคาร์เมท (carbomate compounds) เช่น โปรปอกเซอร์ (proposour)และสารประกอบอินทรีย์ของคลอรีน (organochlorine compounds) บางชนิด สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชยังอาจปนเปื้อนอยู่ในเศษอาหาร (food waste หรือ garbage) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของมูลฝอยชุมชน โดยจะปนเปื้อนในเศษอาหารที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหาร หรือปนเปื้อนในขยะสดจากตลาดที่เป็นแหล่งขายสินค้าเกษตรกรรม

2. ปัจจัยทางด้านการทำงาน

2.1 ระยะเวลาเก็บกัก (Retention Time) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่า ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพนั้น จำนวนและความเข้มข้นของแบคทีเรียจะต้องมีอยู่อย่างเพียงพอ และมีเวลาพอที่จะจัดการกับสารอินทรีย์โดยไม่ถูกชะล้างออกไปเสียก่อน แต่สำหรับในการออกแบบระบบแล้วนั่นย่อม

ตารางที่ 2.3 ตัวยับยั้งระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Polprasert, 1989 อ้างจาก EPA, 1979)

สาร	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
Volatile acids	>2,000 (ในรูปกรดอะซิติค)(ก)
Ammonia nitrogen	1,500-3,000 (ที่ pH>7.6)
Sulfide (soluble)(ข)	>200
	>3,000 เป็นพิษ
Calcium	2,500-4,500
	8,000 ยับยั้งอย่างรุนแรง
Magnesium	1,000-1,500
	3,000 ยับยั้งอย่างรุนแรง
Potassium	2,500-4,500
	12,000 ยับยั้งอย่างรุนแรง
Sodium	3,500-5,500
	8,000 ยับยั้งอย่างรุนแรง
Copper	0.5 (ในรูปสารละลาย)
Cadmium	150(ค)
Iron	1,710(ค)
$Chromium^{+6}$	3
$Chromium^{+3}$	500
Nickel(ง)	2

(ก) ที่ pH 6.6-7.4 และมีบัฟเฟอร์อย่างเพียงพอ ระบบสามารถทนต่อความเข้มข้นของกรดระเหยได้ถึง 6000-8000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ข) ระดับความเข้มข้นที่เป็นพิษคือ 6 เปอร์เซ็นต์

(ค) หน่วย มิลลิโมลของโลหะต่อกรัมของแข็งแห้ง

(ง) ที่ความเข้มข้นต่ำนิเกิลจะช่วยในการสร้างมีเทน เนื่องจากเป็นโลหะที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์

หมายถึงขนาดของถังหมักที่พอเหมาะและรวมไปถึงค่าใช้จ่ายโดยตรงของระบบด้วย

ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (solid retention time, SRT) เป็นปัจจัยในการออกแบบที่สำคัญ ซึ่งจะหมายถึงมวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกระบบต่อวัน สำหรับในระบบถังหมักแบบธรรมดาหรือถังเดี่ยวที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ภายในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำทิ้ง (hydraulic retention time, HRT) โดยจะมีค่าเท่ากับปริมาตรของถังหมักหารด้วยอัตราการป้อนสารอาหารเข้าระบบ (สมการที่ 2.10) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอนแล้ว จะมีค่า SRT มากกว่าค่า HRT

$$HRT = SRT = volume/flow = V/Q \qquad (2.10)$$

2.2 ลักษณะสารอาหาร (Substrate characteristics) ส่วนประกอบของสารอาหารก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญเช่นกัน ในการที่จะกำหนดลักษณะของระบบนิเวศภายในถังหมัก โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดเลือกแบคทีเรียที่จะใช้สารประกอบต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วของเสียที่จะนำบำบัดโดยกระบวนการไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยสารประกอบต่าง ๆ เหล่านี้เป็นหลักได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) โพลีแซกคาไรด์ (polysaccharides) กรดอะมิโน (amino acids) โปรตีน (proteins) กรดไขมัน (fatty acids) ไขมัน (lipids) อัลกอฮอล์ (alcohols) และกลุ่มของสารประกอบไนโตรเจนจากเซลของสิ่งมีชีวิต

เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้เป็นพวกสารอินทรีย์ ในการวัดปริมาณความเข้มข้นจึงวัดค่าออกมาในรูปของ ซีโอดี (COD) บีโอดี (BOD) และของแข็งระเหย (volatile solid, VS) และสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการป้อนสารอาหารได้จากสมการ 2.11 ซึ่งใน

$$\text{อัตราการป้อนสารอาหาร (Organic loading)} = \frac{\text{COD หรือ BOD หรือ VS}}{\text{HRT}} \qquad (2.11)$$

การที่เพิ่มอัตราการป้อนสารอาหาร สามารถทำได้โดยให้มีระยะเวลาการเก็บกักที่เร็วขึ้นหรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือ ของเสียที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้การผลิตก๊าซลดลงได้ เพราะว่ามีของแข็งอยู่ในถังหมักจำนวนมาก ทำให้เกิดการสะสมของก๊าซข้างใต้ ซึ่งก๊าซบางตัวจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ เช่น แอมโมเนีย และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น

ดังนั้นก่อนการป้อนสารอาหารเข้าสู่ระบบ อาจจำเป็นที่จะต้องทำการเจือจางสารอาหาร ซึ่งการเจือจางนอกจากจะช่วยลดการสะสมของก๊าซแล้ว ยังช่วย ทำให้การป้อนสารอาหารแบบต่อเนื่องทำได้ง่ายขึ้น และช่วยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอาหารได้ดี แต่ก็มีผลเสียคือทำให้ต้องใช้ระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ขนาดของถังหมักก็ต้องใหญ่ขึ้น และปริมาณความร้อนที่ใช้ต้องสูงขึ้นตามด้วย

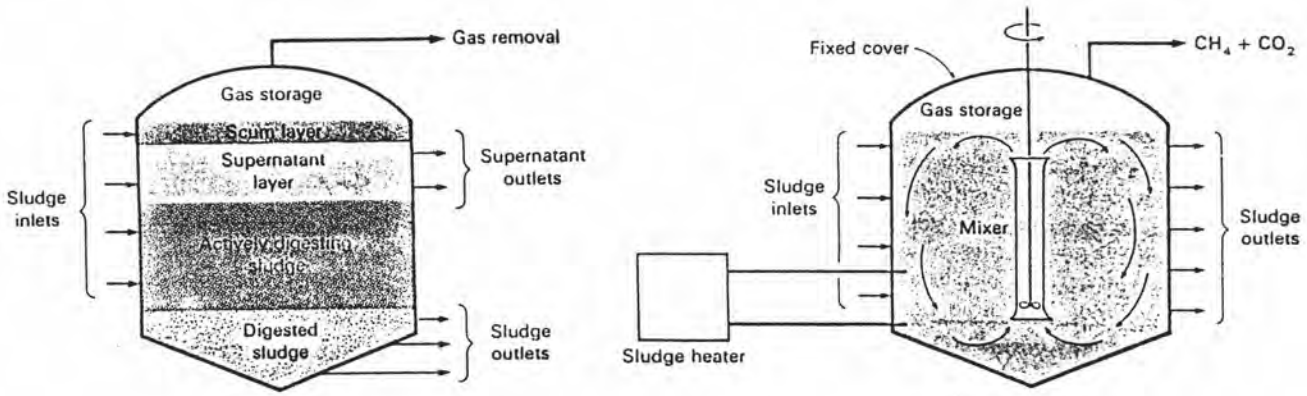
2.3 การผสม (Mixing) การผสมเป็นการช่วยทำให้สภาพแวดล้อมภายในถังหมักเป็นเนื้อเดียวกัน และยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบ โดยจะช่วยให้เกิดการกระจายของตะกอนและสารอาหารทำให้เกิดการสัมผัสกับแบคทีเรียมากขึ้น วิธีที่จะทำให้เกิดการผสมทำได้หลายวิธี คือ ใช้เครื่องกวน การวนด้วยก๊าซ และการปั๊มให้สารอาหารหมุนเวียน

<u>รูปแบบระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน</u>

รูปแบบระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ (Tchobanoglous and Burton, 1991; สุเมธ ชวเดช, 2535)

1. ระบบถังหมักแบบธรรมดา (Standard-rate digestion process) ดังแสดงรูปที่ 2.6ก) ระบบนี้จะไม่มีการเพิ่มอุณหภูมิและการกวน จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำเนื่องจากมีจำนวนของจุลินทรีย์ต่ำ แต่เป็นระบบที่ง่ายและสะดวกในการควบคุมดูแล ระยะเวลาเก็บกักของระบบนี้จะอยู่ในช่วง 30-60 วัน

2. ระบบถังหมักแบบอัตราเร่งสูง (High-rate digestion process) ดังแสดงในรูปที่ 2.6ข) เป็นระบบที่ได้พัฒนารูปแบบสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์เข้มข้นสูงและบำบัดกากตะกอน การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแบบนี้จากระบบแบบดั้งเดิม ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรีย ซึ่งวิธีการคือ หาตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวสูงให้แบคทีเรียเกาะติดเป็นเมือกหรืออาจตกตะกอนแบคทีเรียที่มากับน้ำล้นแล้วสูบตะกอนกลับเข้าถังหมัก หรืออาจควบคุมความเร็ว

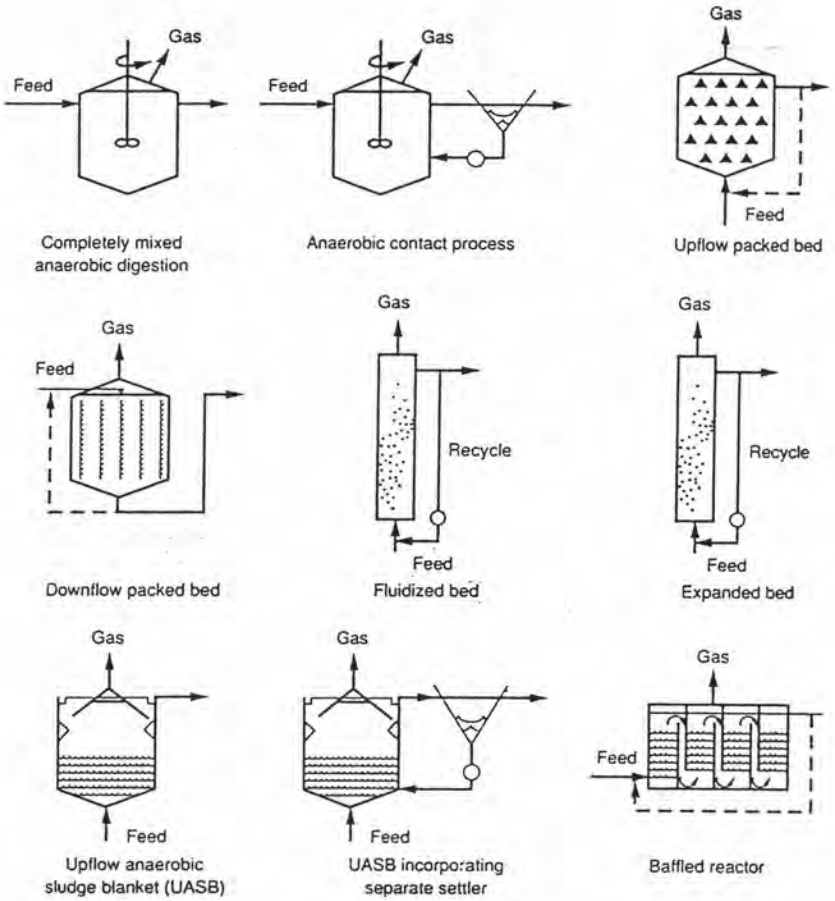


รูปที่ 2.6 ระบบถังหมักแบบธรรมดาและแบบอัตราเร่งสูง (Tchobanoglous and Burton, 1991)

ของน้ำเสียที่ไหลผ่านถังหมักให้เหมาะสม จนเกิดเม็ดขนาดใหญ่ของแบคทีเรียที่จับเกาะกันแน่น (granular bacteria) ระบบถังหมักแบบนี้สามารถแยกออกได้เป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้ (รูปที่ 2.7)

2.1 ระบบ Anaerobic Contact Process น้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายประเภทสามารถทำให้คงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยระบบแบบนี้ ระบบนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (activated sludge) แต่มีลักษณะเป็นระบบปิดเพื่อทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจน น้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัดจะถูกทำให้เกิดการผสมอย่างสมบูรณ์ และภายหลังการย่อยสลาย น้ำล้นจะถูกผ่านลงถังตกตะกอน และกากตะกอนแบคทีเรียจะถูกสูบกลับเข้าถังหมักรวมกับน้ำเสียอีก

2.2 ระบบ Upflow Anaerobic Sludge-Blanket Process (UASB) น้ำเสียจะถูกสูบเข้าทางด้านล่างของถังหมักโดยมีอัตราการไหลขึ้นประมาณ 0.6-0.9 เมตรต่อชั่วโมง ผ่านชั้นกรานูล (granules) ซึ่งเป็นก้อนของแบคทีเรียที่จับตัวกันบริเวณด้านล่างถัง และผ่านชั้นของแบคทีเรียที่เป็นตะกอนเบา ช่วงบนของถังจะมีกรวยแยกตะกอน (settler) น้ำใสเท่านั้นที่ไหลล้นออกจากถังหมัก



รูปที่ 2.7 ระบบถังหมักแบบอัตราเร่งสูงในรูปแบบต่าง ๆ (Tchobanoglous and Burton, 1991)

2.3 Anaerobic Filter เป็นระบบที่ถังหมักมีรูปร่างทรงสูง ภายในบรรจุตัวกลางของแข็งซึ่งมีหลายชนิด เช่น ตัวกลางพลาสติก หิน ขนาด 1.5-2 นิ้ว เป็นต้น น้ำเสียจะถูกสูบขึ้นและผ่านตัวกลางที่มีเมือกของแบคทีเรียเกาะเป็นชั้นหนาบนผิว และติดตามช่องว่างระหว่างตัวกลาง ทำให้แบคทีเรียไม่หลุดออกไปพร้อมกับน้ำล้น

2.4 ระบบ Expanded-Bed Process น้ำเสียจะถูกสูบขึ้นผ่านชั้นตัวกลางที่มีขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร) เช่น ทราย ถ่าน เป็นต้น โดยแบคทีเรียจะเกาะเป็นเมือกคลุมผิวตัวกลาง น้ำเสียที่ไหลผ่านถังจะสามารถยกเม็ดตัวกลางให้ลอยได้ ทำให้ตัวกลางเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระ แบคทีเรียก็จะสัมผัสกับน้ำเสียได้อย่างทั่วถึง และเม็ดตัวกลางจะเกิดการขัดสี

และชนกัน เมือกของแบคทีเรียจะหลุดออกจึงเป็นการควบคุมความหนาของเมือกแบคทีเรีย สำหรับน้ำล้นที่ออกจากถังหมักจะถูกเวียนเพื่อเจืองจางน้ำเสียที่จะป้อนเข้าถังหมัก และเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้เหมาะสมที่จะรักษาสภาพของชั้นตัวกลาง

<u>การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน</u>

ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้ได้ก๊าซมีเทนนั้น เป็นการทำงานของแบคทีเรียสองกลุ่มใหญ่ที่มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแตกต่างกัน การทำงานร่วมกันระหว่างแบคทีเรียภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน จะทำให้ระบบทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นการแยกแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มออกจากกัน โดยวิธีการแยกถังหมักและจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม ถังแรกจะถูกควบคุมให้สภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับแบคทีเรียที่สร้างกรด ขณะเดียวกันถังที่สองรับผลผลิตจากถังแรก ก็จะถูกจัดให้เหมาะสมสำหรับกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน การแยกขั้นตอนการทำงานของจุลชีพออกจากกันนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย (Ghosh, Conrad and Klass, 1975) ดังนี้

1. ข้อดีของการย่อยสลายแบบสองขั้นตอน

1.1 สามารถรักษาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพแต่ละกลุ่มได้

1.2 ช่วยลดขนาดของถังหมักได้ ทำให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการก่อสร้างและในการเดินระบบ

1.3 มีอัตราการทำให้ของแข็งคงสภาพสูง (solids stabilization) เพิ่มอัตราการผลิตก๊าซ และมีเปอร์เซนต์ของก๊าซมีเทนสูง

1.4 ลดความต้องการความร้อน (heat requirement) และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนด้วย (thermal efficiency)

1.5 เหมาะสำหรับติดตั้งร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่แล้ว โดยเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ

1.6 ลดองค์ประกอบของไนโตรเจนที่ออกจากระบบ โดยการย่อยสลายได้เป็นสารละลาย และเกิดปฏิกิริยา denitrification ของน้ำที่ไหลสู่ถังหมักกรด

2. ข้อเสียของการย่อยสลายแบบสองขั้นตอน

2.1 ต้องมีการควบคุมโดยผู้ที่มีความชำนาญ และ

2.2 ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มในการติดตาม ตรวจสอบ และควบคุม

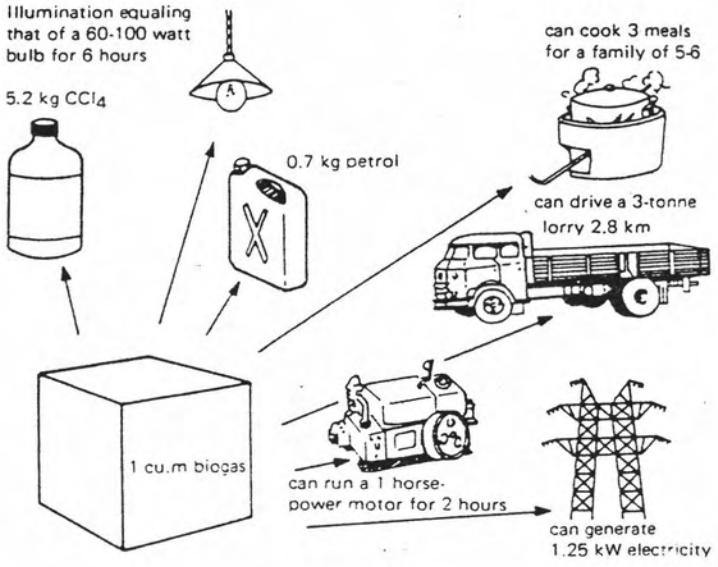
<u>ก๊าซชีวภาพ</u>

ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงก๊าซที่ได้จากอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ถูกหมักและย่อยสลายโดยกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่เหมาะสมภายในถังหมัก ลักษณะทางเคมีของก๊าซชีวภาพคือ มีความเสถียร ไม่ละลายในน้ำ และเบากว่าอากาศ ก๊าซชีวภาพจะประกอบไปด้วยก๊าซต่าง ๆ หลายชนิด ได้แก่ ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต แต่ก๊าซที่สำคัญคือก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส และมีลักษณะที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.4

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ให้แสงสว่างหรือขับเครื่องยนต์ได้ โดยก๊าซปริมาณ 1 ลูกบาศ์กเมตร จะให้พลังงานความร้อน 5,200-5,900 กิโลแคลอรี่ ซึ่งจะเพียงพอสำหรับต้มน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ปริมาณ 130 กิโลกรัม ให้เดือดได้ หรือให้แสงสว่างจากตะเกียงก๊าซที่ความสว่าง 60-100 วัตต์ ได้นาน 5-6 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ที่มีกำลัง 1 แรงม้า ได้ 2 ชั่วโมง ซึ่งเทียบเท่ากับน้ำมัน 0.6-0.7 กิโลกรัม และยังสามารถปั่นไฟฟ้า ได้ 1.25 กิโลวัตต์ (รูปที่ 2.8)

Chemical formula:	CH_4
Molecular weight:	16.042
Boiling point at 14.696 psia (760 mm)	-258.68 F (-161.49 ^{0}C)
Freezing point at 14.696 psia (760 mm)	-296.46 F (-182.48 ^{0}C)
Critical pressure:	673.1 psia (47.363 kg/cm^2)
Critical temperature:	-116.5 F (-82.5 ^{0}C)
Specific gravity:	
Liquid (at -263.2 ^{0}F {-164 ^{0}C})	0.415
Gas (at 77 ^{0}F {25 ^{0}C}) and	
14.696 psia (760 mm)	0.000658
Specific volume at 60 ^{0}F (15.5 ^{0}C) &	
14.696 psia (760 mm):	23.61 ft^3/lb (1.471 l/gm)
Calorific value 60 ^{0}F (15.5 ^{0}C) &	
14.696 psia (760 mm):	1,012 Btu/ft^3 (38,130.71 kJ/m^3)
Air required for combustion ft^3/ft^3	9.53
Flammability limits:	5 to 15 percent by volume
Octane rating:	130
Ignition temperature:	1,202 ^{0}F (650 ^{0}C)
Combustion equation:	$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$
O_2/CH_4 for complete combustion:	3.98 by weight
O_2/CH_4 for complete combustion:	2.0 by volume
CO_2/CH_4 from complete combustion:	2.74 by weight
CO_2/CH_4 from complete combustion:	1.00 by volume

ตารางที่ 2.4 ลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีที่สำคัญของก๊าซมีเทน (Polprasert and Thanh, 1982)



รูปที่ 2.8 การใช้ก๊าซชีวภาพ (Buren, 1979 quoted in Poprasert, 1982)

ตลาดสดสามย่าน

ตลาดสดนับได้ว่า เป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดมูลฝอยปริมาณมากแหล่งหนึ่งภายในชุมชน โดยเฉพาขยะสดที่เป็นเศษผัก ผลไม้ ดอกไม้ และเศษเนื้อสัตว์ ที่เหลือจากการจำหน่ายให้แก่ผู้คนที่มาจับจ่ายเพื่อนำไปประกอบอาหาร จากการรวบรวมข้อมูลจำนวนตลาดของ ฝ่ายสุขาภิบาลอาหาร กองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร ในปี 2535 พบว่า กรุงเทพมหานคร มีจำนวนตลาดสดสาธารณะ 16 ตลาด และมีตลาดเอกชนถึง 167 ตลาด

ตลาดสามย่าน เป็นตลาดสดเอกชนโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นผู้ถือใบอนุญาต ตั้งอยู่ในซอยจุฬา 54 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ มีพื้นที่ทั้งหมด 4,480 ตารางเมตร ลักษณะเป็นตึก 2 ชั้น เปิดโล่งทั้ง 4 ด้าน รอบๆ ของตลาดจะเป็นตึกแถวที่ประกอบกิจการต่าง ๆ ได้แก่ ร้านค้า ร้านอาหาร ที่อยู่อาศัย เป็นต้น ชั้นบนของตลาดเป็นร้านจำหน่ายอาหาร ส่วนชั้นล่างเป็นที่จำหน่ายอาหารสด ผักสด ผลไม้ และดอกไม้ รวมทั้งอาหารแห้งและหนังสือ มีจำนวนแผงที่ขายทั้งสิ้นประมาณ 310 แผง (รูปที่ 2.9-2.10) มูลฝอยที่เกิดภายในตลาดจะมีเจ้าหน้าที่รวบรวมและเก็บขนไปเก็บไว้ในถังรองรับที่อยู่ด้านหลังตลาด โดยจะเป็นถังที่ใช้กับรถเก็บขนขยะแบบเปลี่ยนถัง และเป็นถังขนาด 200 ลิตร (รูปที่ 2.11)

รูปที่ 2.9 ลักษณะภายในของตลาดสดสามย่านบริเวณชั้น 1 และชั้น 2

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.10 ลักษณะภายในของตลาดสดสามย่านบริเวณชั้น 1 ที่จำหน่ายอาหารสดต่าง ๆ

รูปที่ 2.11 ถังรองรับมูลฝอยของตลาดสดสามย่าน