บทที่ 3
ทฤษฎีการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนอิสระ

3.1 กล่าวนำ

สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้งชุมชน สิ่งปฏิกูล มูลสัตว์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตลอดจนน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถถูกย่อยสลายได้ โดยขบวนการชีวเคมีทั้งแบบอาศัย และไม่ต้องอาศัยออกซิเจนอิสระ ขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนอิสระนี้ มีความเหมาะสมสำหรับน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสูง เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น และเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับประเทศที่อยู่ในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย นอกจากนี้ยังให้ผลตอบแทนในรูปของก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ อีกทั้งสามารถลดปัญหาการกำจัดกากตะกอน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายจะเปลี่ยนเป็นมวลจุลินทรีย์น้อยกว่าในระบบการย่อยสลายแบบอาศัยออกซิเจนอิสระ

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนอิสระ

ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดในระบบหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอิสระนั้น ที่สำคัญๆ ได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์ การย่อยทำลายซัลเฟตไปเป็นก๊าซไข่เน่า และการย่อยทำลายไนเตรทไปเป็นไนโตรเจน โดยมีรายละเอียดดังนี้ (2,3)

3.2.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ

ปฏิกิริยาชีวเคมีในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบกทีเรีย ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ สามารถแบ่งแยกเป็น 3 ขั้นตอน ได้ดังนี้

(1) Hydrolysis

ในขั้นตอนแรกนี้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรท ไขมัน และโปรตีนต่าง ๆ จะถูกย่อยแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง และสามารถละลายน้ำได้ เป็นการย่อยสลายภายนอกเซลล์ โดยน้ำย่อยที่ปล่อยออกจากแบกทีเรีย (external enzyme) ตามชนิดของสารอินทรีย์นั้น ๆ

(2) Acidogenesis

ในขั้นตอนที่สองนี้ แบกทีเรียพวกสร้างกรด (acid formers) จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและอยู่ในรูปของสารละลายที่ผ่านขั้นตอน Hydrolysis มาแล้ว โดยการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบกทีเรีย เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ และใช้เป็นพลังงาน ในช่วงนี้เองสารอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ (volatile fatty acids) และสารอื่น ๆ โดยกลไกการย่อยสลายภายในเซลล์ ตามชนิดของสารอินทรีย์นั้น ๆ ซึ่งจะได้กรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และอยู่ในรูปสารละลาย โดยแบกทีเรียพวกสร้างกรดเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะได้กรดไพรูวิก (pyruvic acid) ก่อนเสมอ แล้วกรดไพรูวิกนี้จึงถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซีติก (acetic acid) และกรดอินทรีย์อื่น ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนั้นจะเป็นแอลกอฮอล์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (4,5)

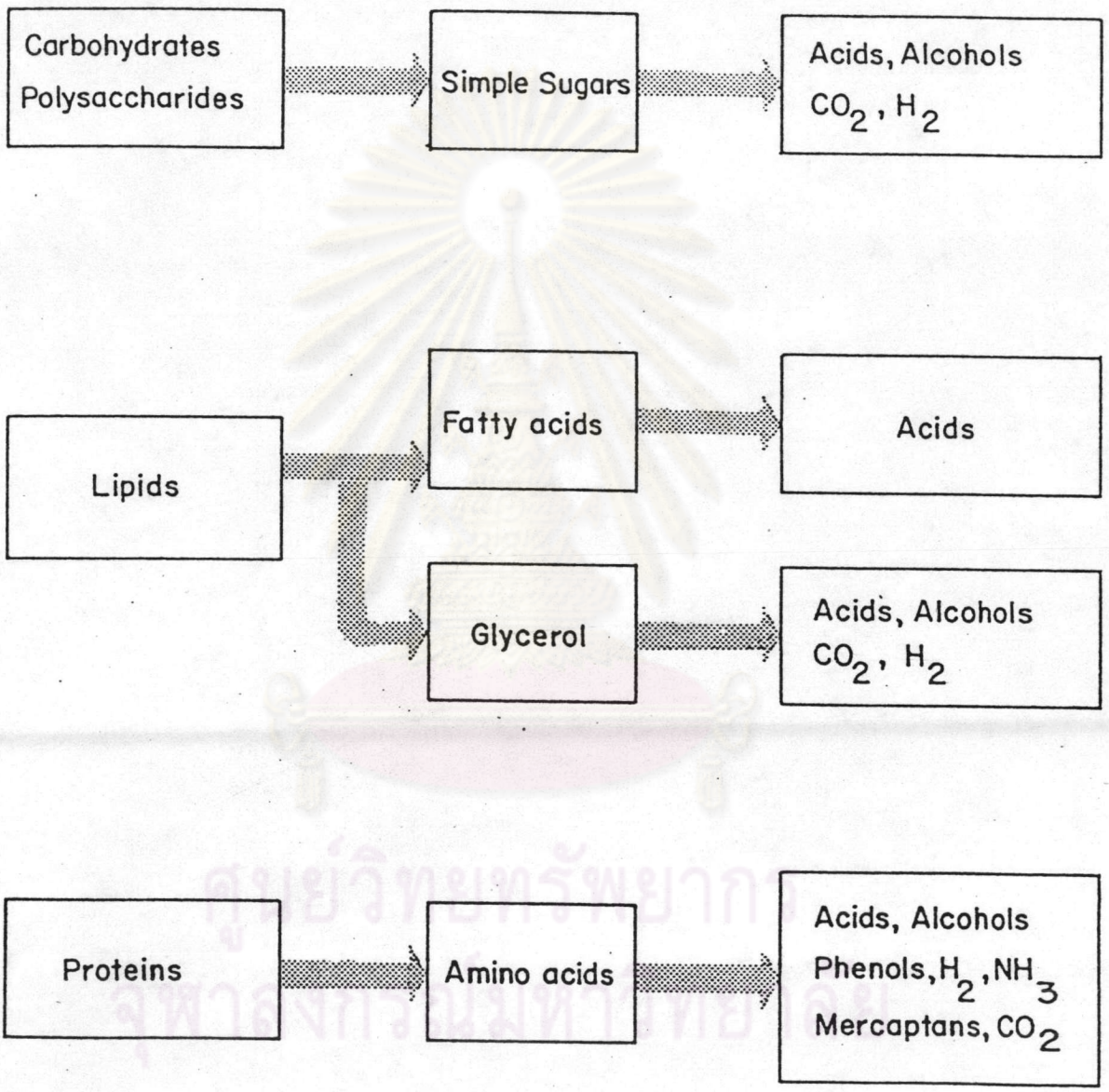
การย่อยสลายที่ไม่ผ่านกรดไพรูวิก สามารถเกิดขึ้นได้บ้าง เช่น การรวมตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยแบกทีเรีย Clostridum aceticum ได้กรดอะซีติก (6) ดังสมการ

$$2CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2O$$

แบกทีเรียพวกสร้างกรดนี้ส่วนมากเป็นประเภท Facultative bacteria กล่าวคือ สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ ดังนั้น แบกทีเรียเหล่านี้ จึงมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี แบกทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ genera Pseudomonas , Flavobacterium , Alcaligenes , Escherichia และ Aerobacter (7)

แบกทีเรียพวกสร้างไฮโดรเจน (hydrogen producing acetogenic bacteria) ก็มีความสำคัญในขั้นตอนนี้ เช่น Desulfovibrio desulfuricans สามารถเปลี่ยนแลคเตท (lactate) เป็นอะซีเตท (acetate) ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ต้องอยู่ในสภาวะที่มีการใช้ ไฮโดรเจน โดยแบกทีเรียพวกสร้างมีเทน (methane formers) ดังสมการเคมี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogenesis

$$CH_2CHOHCOO^- + 2H_2O \longrightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$$

(3) Methanogenesis

ในขั้นตอนนี้แบกทีเรียพวกสร้างมีเทนจะทำหน้าที่ย่อยสลายผลผลิตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอน Acidogenesis อันได้แก่ กรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และอื่น ๆ การย่อยสลายในขั้นตอนนี้ จะเป็นการลดค่าซีโอดี หรือบีโอดี ได้สูงมากกว่าขั้นตอนการหมักกรดอินทรีย์และได้ก๊าซมีเทนเกิดขึ้น

ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่มาจากปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยสลายกรดอะซีติก ดังสมการ

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

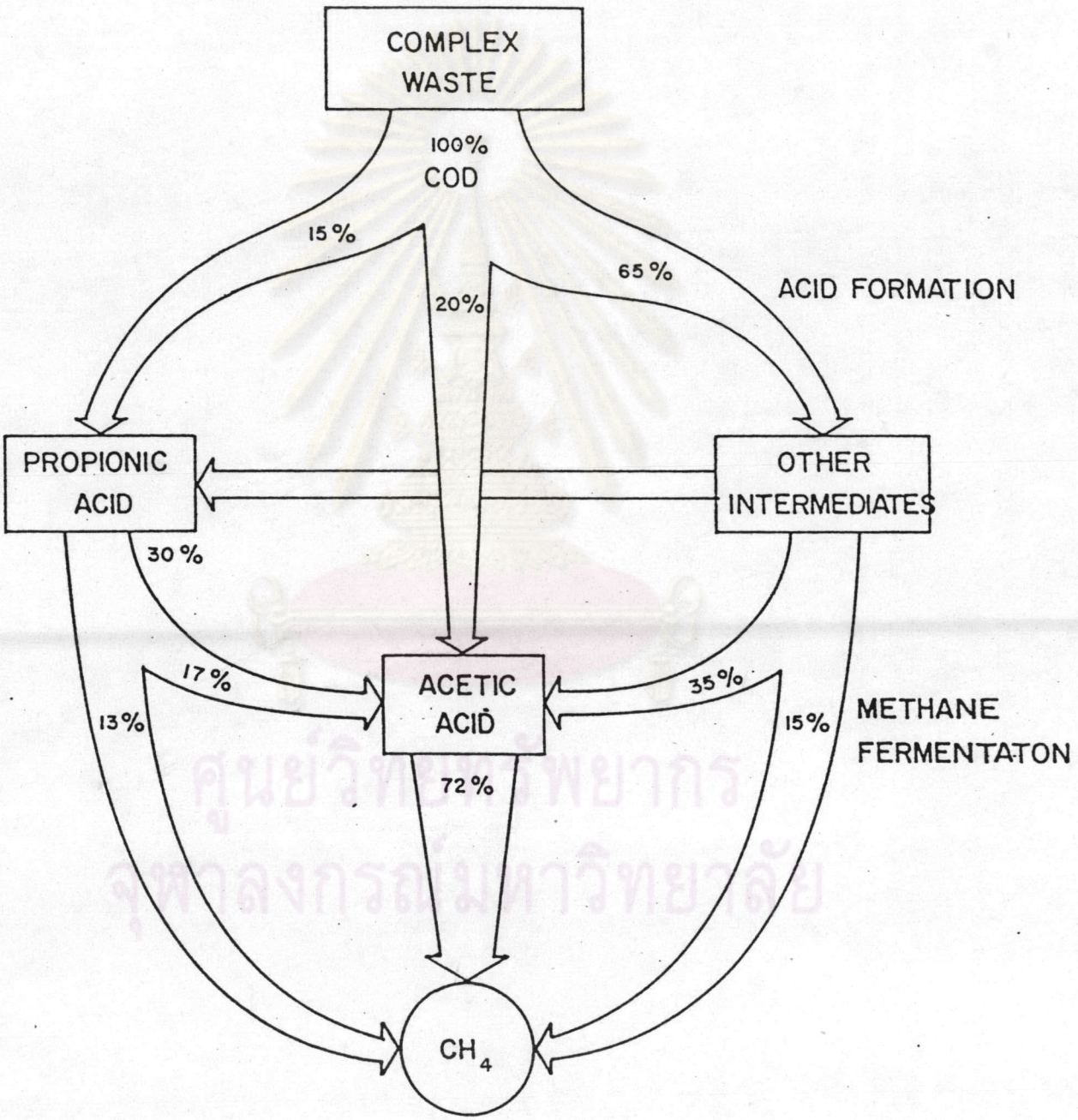
นอกจากนี้ยังมีก๊าซมีเทนที่มาจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ดังสมการ

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

Jerisและ McCarty(8)ได้ใช้สารประกอบคาร์บอนกัมมันตรังสี C_{14} ทดสอบการย่อยสลายของสารอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่าประมาณร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนเกิดมาจากการสลายตัวของกรดอะซีติก ซึ่งในปัจจุบันยังเป็นที่ยอมรับและได้สรุปการเกิดของก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนอิสระ โดยเปรียบเทียบกับซีโอดี ดังรูปที่ 3.2

แบกทีเรียพวกสร้างมีเทนจัดอยู่ในพวก Obligate anaerobic bacteria ซึ่งดำรงชีวิตได้ในสภาพไร้ออกซิเจนอิสระเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่ำกว่าแบกทีเรียพวกสร้างกรด แบกทีเรียกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ได้แก่ genera Methanobacterium , Methanosarcina และ Methanococus (7)

ปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอิสระนี้จะได้ก๊าซชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนั้นยังประกอบด้วยก๊าซอื่น ๆ อีกเล็กน้อย เช่น ก๊าซไข่เน่าและก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ

Buswell et. al(9)ได้ทำการศึกษากระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอิสระ และได้เสนอสมการการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนอิสระโดยทั่วไป ดังนี้

$$C_nH_aO_b + (n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2})H_2O \longrightarrow (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4})CO_2 + (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} + \frac{b}{4})CH_4$$

ในระบบย่อยสลายไร้ออกซิเจนอิสระนี้ พลังงานที่อยู่ในสารอินทรีย์ประมาณ 90% จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซมีเทน หรือประมาณได้ว่า 1 กิโลกรัม ของค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด จะให้ก๊าซมีเทน 0.31 - 0.44 $ม^3$ โดยมีสัดส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพประมาณ 60-75 %

3.2.2 <u>ปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยทำลายซัลเฟต</u> (sulphate Reduction)

ในสภาพไร้ออกซิเจนอิสระ ซัลเฟตในน้ำเสียนั้นสามารถถูกนำไปใช้เป็นแหล่งให้ออกซิเจนโดยแบกทีเรียกลุ่มหนึ่งเรียกว่า Sulphate - reducing bacteria โดยได้พลังงานจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างซัลเฟตกับสารอินทรีย์ ดังสมการ

$$SO_4^{2-} + \text{Organic matter} \xrightarrow[\text{Bacteria}]{\text{Sulphate Reducing}} S^{2-} + H_2O + CO_2$$

เช่น แบคทีเรียพวก <u>Desulfovibrio</u> ได้พลังงานจากปฏิกิริยาดังนี้

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

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

จะเห็นว่าปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยทำลายซัลเฟตโดยแบกทีเรียดังกล่าวนี้ จะได้ก๊าซไข่เน่า ซึ่งมีกลิ่นเหม็นรบกวน มักจะเกิดในท่อระบายน้ำเสียทั่วไป และในบ่อหมัก แบกทีเรียกลุ่มนี้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชและอุณหภูมิได้ดี ดังนั้นการเกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซไข่เน่านี้ จึงเกิดขึ้นทั่วไปไม่ว่าระบบหมักเหล่านั้นจะอยู่ในสภาพใดก็ตาม ความรุนแรงของกลิ่นเหม็นจากก๊าซไข่เน่านี้มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของน้ำเสีย ดังสมการเคมี

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

จะเห็นว่าภายใต้สภาพเป็นกรด ระบบจะมีกลิ่นเหม็นรุนแรงขึ้น สำหรับระบบหมักทั่วไปที่อยู่ในสภาพเป็นกลาง (พีเอชประมาณ 7.0) จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวระหว่างโลหะไอออนกับซัลไฟด์เป็นตะกอนดำของโลหะซัลไฟด์ จึงทำให้ตะกอนแบกทีเรียในระบบเป็นสีดำ และปัญหากลิ่นเหม็นจะลดลง แต่ถ้าในกรณีระบบหมักนั้นมีสภาพเป็นกรดหรืออยู่ในสภาวะ Acidogenesis จะไม่เกิดการตกตะกอนของโลหะซัลไฟด์ ดังนั้นตะกอนแบกทีเรียจะมีสีเนื้ออ่อน และมีกลิ่นเหม็นรุนแรง

3.2.3 ปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารไนเตรท (Denitrification)

น้ำเสียที่มีสารไนเตรทและอยู่ภายใต้สภาพไร้ออกซิเจนอิสระ จะมีแบกทีเรียกลุ่มหนึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้โดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างสารไนเตรทกับสารอินทรีย์ แบกทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า Denitrying Bacteria ซึ่งการดำรงชีวิตเป็นแบบ Heterotrophic และเป็นพวก Facultative โดยอาศัยพลังงานจากสารอินทรีย์ต่าง ๆ แบกทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ Pseudomonas , Achromobacter , Bacillus , และ Micrococcus ตัวอย่างเช่น สารอินทรีย์เป็นเมทานอล ไนเตรทจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจน ดังสมการ

$$NO_3^- + \frac{5}{6} CH_3OH \longrightarrow \frac{1}{2} N_2 + \frac{5}{6} CO_2 + \frac{7}{6} H_2O + OH^- + Energy$$

3.3 สภาวะแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการหมัก

สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ, ค่าพีเอช, ปริมาณกรดอินทรีย์, ความเป็นด่าง, ธาตุอาหารเสริมสร้าง, สารพิษ, วิธีการเติมน้ำเสียเข้าระบบ และการกวนผสม ดังนั้นในการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องเข้าใจองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เหล่านี้

3.3.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อแบกทีเรียเป็นอันมากในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยทั่วไปพบว่าอัตราการย่อยสลายจะสูงเป็น 2 เท่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการย่อยสลายในรูปคณิตศาสตร์

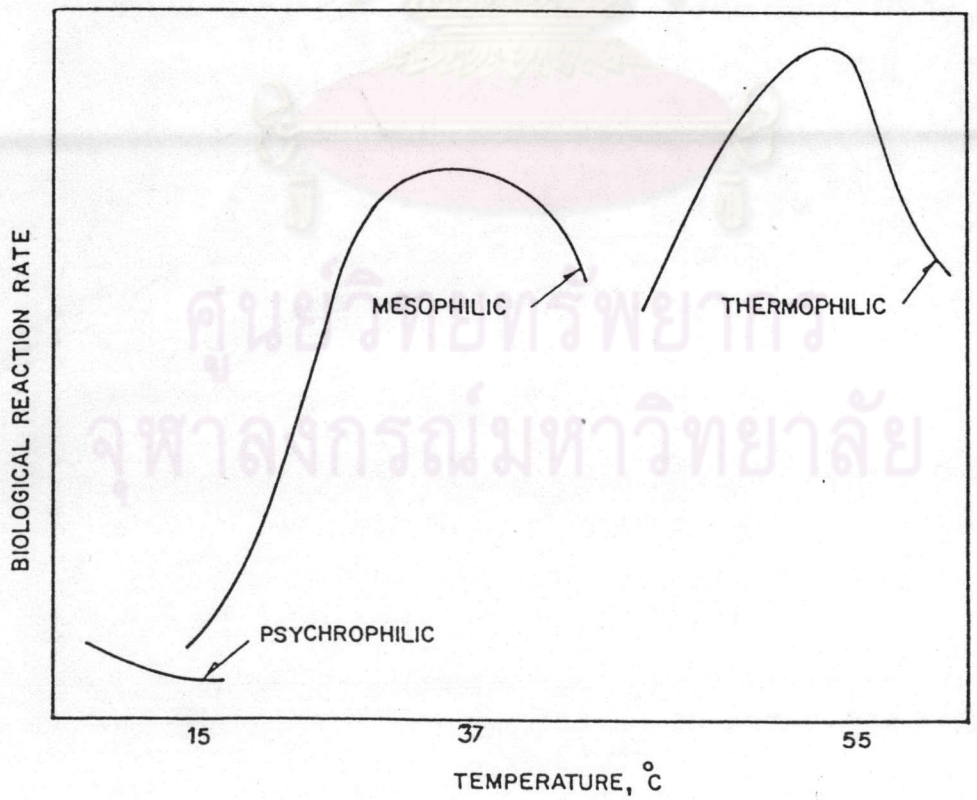
จะไม่กล่าวในรายละเอียดในที่นี้ ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนพบว่ามีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 คือ

(1) Psychrophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 5 – 15 องศาเซลเซียส

(2) Mesophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 35 – 37 องศาเซลเซียส

(3) Theromophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 50 – 55 องศาเซลเซียส

แต่ละช่วงอุณหภูมินี้จะมีกลุ่มแบกทีเรียที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิสูงจะเป็น Thermophilic bacteria ซึ่งค้นเคยที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปการควบคุมในถังหมักมักนิยมในช่วง Mesophilic มากกว่าอีก 2 ช่วงอุณหภูมิ เนื่องจากช่วง Mesophilic มีอัตราย่อยสลายสูงกว่าช่วง Psychrophilic มาก และไม่ต้องใช้พลังงานสูงมากในการควบคุมเหมือนช่วงอุณหภูมิ Thermophilic เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ พวก Thermophilic bacteria นี้ไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีเท่าแบกทีเรียในช่วงอุณหภูมิอื่น สำหรับอากาศร้อน เช่น ประเทศไทยอุณหภูมิน้ำเสียก่อนเข้าระบบหมักจะมีอุณหภูมิเฉลี่ย



รูปที่ 3.3 อิทธิพลอุณหภูมิต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ

ประมาณ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในถังหมักจะสูงขึ้นอีก 3 – 5 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อพลังงานในการดำรงชีวิตของแบกทีเรีย (respiration) ดังนั้นอุณหภูมิในถังหมักจะใกล้กับช่วง Mesophilic อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องมีการให้ความร้อนและมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแต่อย่างไร

แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงระยะหลังได้มีการศึกษาวิจัยที่จะควบคุมระบบหมักที่อุณหภูมิสูงในช่วง Thermophilic โดยคิดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้สูงขึ้น ดังนั้นในอนาคตคาดว่าจะมีการนำระบบหมักที่อุณหภูมิสูงมาใช้ประโยชน์มากขึ้น

3.3.2 <u>พีเอช</u>

พีเอชมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มาก โดยแบกทีเรียทั้งในภาวะมีและไม่มีออกซิเจนอิสระ แบกทีเรียเช่นเดียวกับสิ่งที่มีชีวิตอื่น ๆ จะเจริญเติบโตไม่ดีในสภาพเป็นกรดและสภาพเป็นด่าง ช่วงพีเอชเป็นกลางคือ 6.5 ถึง 7.8 เป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบกทีเรีย (10,11,12) ถ้าพีเอชในระบบหมักมีค่าต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของแบกทีเรียพวกสร้างมีเทนจะต่ำลง แต่ถ้าค่าพีเอชนี้ต่ำถึง 5.0 ก็จะมีอันตรายอย่างรุนแรงต่อแบกทีเรียพวกสร้างมีเทน ส่วนแบกทีเรียพวกสร้างกรดมีความสามารถคงทนต่อสภาพเป็นกรดได้ต่ำถึง 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้เนื่องจากแบกทีเรียกลุ่มนี้ย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วขับถ่ายของเสียเป็นพวกกรดอินทรีย์ ดังนั้นโดยธรรมชาติแล้ว จึงทำให้แบกทีเรียกลุ่มนี้มีความคงทนต่อสภาพเป็นกรดได้ดีกว่าแบกทีเรียโดยทั่วไป ค่าพีเอชในถังหมักมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นด่างและความเข้มข้นกรดอินทรีย์ในถังหมักนั้น ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

3.3.3 <u>ความเป็นด่าง</u>

ความเป็นด่างคือความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอน ค่าความเป็นด่างวัดเป็น มก./ล. ในรูปของ $CaCO_3$ ความเป็นด่างในน้ำอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต, คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ จำนวนอนุมูลเหล่านี้จะมีผลกับค่าพีเอช ดังนั้นค่าความเป็นด่างในระบบหมักจึงเป็นตัวเลขที่บ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง ย่อมแสดงว่าระบบหมักมี Buffering Capacity สูง ในการรักษาค่าพีเอชให้คงตัวอยู่ได้นานต่อการเพิ่มของปริมาณกรดใด ๆ แต่ในทางตรงข้ามถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างต่ำ

ก็จะแสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในปริมาณค่อนข้างสูงในระบบแล้ว จำเป็นต้อง เพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมัก เพราะมีความโน้มเอียงที่จะ เป็นกรดได้ง่าย ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อระบบหมักนี้มีค่าประมาณ 1,000 – 3,000 มก./ล. ถ้าค่าความเป็นด่างสูงกว่านี้ก็จะก่ออันตรายต่อแบกทีเรียได้ ในระบบหมักที่ทำงานสมบูรณ์ ค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารแอมโมเนียมไบคาร์โบเนต ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายสารโปรตีนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แบกทีเรียขับออกมา ดังสมการข้างล่าง

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

3.3.4 <u>กรดอินทรีย์</u>

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจนอิสระนั้น มีแบกทีเรีย 2 กลุ่ม ซึ่งอาจอาศัยอยู่ร่วมกันหรือแยกกันก็ได้ โดยกลุ่มแรกจะย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วให้กรดอินทรีย์ออกมา ซึ่งแบกทีเรียกลุ่มที่สองจะใช้กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหาร และให้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นจะเห็นว่าในขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้จะมีกรดอินทรีย์เป็น Intermediate products กรดอินทรีย์นี้อาจสะสมได้ในกรณีที่ระบบไม่อยู่ในสมดุลย์ คือมีการสร้างกรดอินทรีย์มากกว่าการใช้กรดอินทรีย์ ถ้ามีการสะสมกรดอินทรีย์เกิดขึ้นในระบบในช่วงแรกจะลดค่าความเป็นด่างก่อน จนกระทั่งหมดแล้ว ถ้ายังมีการสะสมกรดอยู่อีกในที่สุด ค่าพีเอชจะลดลง ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ก็จะเป็นอันตรายต่อแบกทีเรียพวกสร้างมีเทน ในกรณีที่มีการสะสมกรดอินทรีย์สูงมากจนค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ถ้าไม่ทำการแก้ไข ในที่สุดค่าพีเอชจะลดลงถึง 4.5 – 5.0 ซึ่งจะทำให้ระบบหมักเกิดสภาพเสียสมดุลย์ระหว่าง Acidogenesis กับ Methanogenesis ซึ่งสามารถสังเกตง่าย ๆ จากกลิ่นเหม็นเปรี้ยวรุนแรง และเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนต่ำมาก

กรดอินทรีย์ที่ตรวจพบในระบบหมักส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอะซีติก กรดบิวไทริก และกรดโพรพิโอนิก โดยส่วนใหญ่จะเป็นกรดอะซีติก ในสภาพพีเอชเป็นกลาง กรดเหล่านี้จะอยู่ในรูปอะซีเตท บิวไทเรท และโพรพิโอเนท ดังนั้นความเป็นพิษต่อแบกทีเรียพวกสร้างมีเทนจะต่ำกว่าอยู่ในรูปของกรด การวัดปริมาณกรดอินทรีย์จึงวัดในรูป มก./ล. ของกรดอะซีติก (CH_3COOH) หรือในรูป meq./l. โดยที่ 60 มก./ล. ของ CH_3COOH

เท่ากับ 1 meq./l. โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักไม่ควรเกิน 2,000 มก./ล. ของ CH_3COOH แต่อาจทนได้ถึง 5,000 มก./ล. ของ CH_3COOH

3.3.5 ธาตุอาหารเสริมสร้าง

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจนอิสระโดยแบกทีเรียนั้น ธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบกทีเรียมากได้แก่ ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) อัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมักควรมีอัตราส่วน COD:N:P = 100:1.1:0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพจะต่ำลง แต่ตรงกันข้ามถ้ามีธาตไนโตรเจนมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบกทีเรีย หรือเปลี่ยนสภาพแบกทีเรียได้ เช่น ตะกอนแบกทีเรียลอยตัวหลุดออกจากระบบได้ นอกจากธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ธาตุอื่น ๆ ที่มีความจำเป็นต่อ ขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้แก่ Ca, Mg, Mo, Co, และ Fe แต่แบกทีเรียต้องการในปริมาณน้อยมาก ดังนั้นธาตุเหล่านี้โดยทั่วไปจึงมีเพียงพอในน้ำเสียอยู่แล้ว ในทางปฏิบัติจึงคำนึงถึงปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่านั้น ถ้าตรวจวิเคราะห์ว่ามีไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเติมสารสองตัวดังกล่าวให้เพียงพอ

3.3.6 สารพิษ (Toxic Substances)

สารอนินทรีย์เกือบทุกสารถ้ามีปริมาณมากเกินไปในระบบหมักก็จะเป็นพิษต่อแบกทีเรียได้ ระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นกับสารนั้น ๆ โดยทั่วไปพวกที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะส่งผลพิษรุนแรงกว่าพวกที่มีน้ำหนักอะตอมเบากว่า และสาร ที่มีวาเลนซี (valency) สูง จะส่งผลพิษรุนแรงกว่าพวก สารที่มีวาเลนซีต่ำกว่า นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพวก Benzene ring ซึ่งแบกทีเรียไม่สามารถย่อยสลายถ้ามีมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบกทีเรียอีกด้วย ตารางที่ 3.1 แสดงระดับความเข้มข้นสารพิษที่มีอันตรายต่อแบกทีเรียในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนอิสระ แต่ในสภาพเป็นจริงที่ปรากฏ น้ำเสียมีปริมาณสารพิษหลายชนิดปะปนอยู่ และมีปริมาณสูงแต่ปรากฏว่าน้ำเสียดังกล่าวยังสามารถถูกย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระได้ โดยไม่แสดงความเป็นพิษให้เห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในขบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนอิสระนี้ มีปฏิกริยาเกิดขึ้นมากมาย เช่น การตกตะกอนของสารพิษ (precipitation) การถูกทำลายเปลี่ยนไปเป็นสารรูปอื่น และการรวมตัวของไอออนต่าง ๆ จึงเกิดสภาพลดหรือเสริมความเป็นพิษ (antagonism and synergism) นอกจากนี้ยังขึ้นกับค่าพีเอชในระบบหมักอีกด้วย

ตารางที่ 3.1 ระดับความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบกทีเรีย ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนอิสระ (13)

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบกทีเรีย มก./ล.
Cu	1.0
Zn^{6+}	5.0
Cr^{3+}	5.0
Total Chromium	2,000
Ni	5.0
Cd	2.0
S^{-}	0.02
SO_4^{2-}	100
Ammonia	500
Na^{+}	1,500
K^{+}	3,500
Ca^{2+}	2,500
Mg^{2+}	2,500
Aerylonitrite	1,000
Benzene	5.0
$C Cl_4$	50
Chloroform	10
Pentachlorophenol	0.1
Cyanide	0.4
	1.0

3.3.7 การเติม (Feeding Model)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักอาจแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ

(1) เติมทีละเท (Batch Feed)

(2) เติมกึ่งต่อเนื่อง (Semi - Continuous Feed)

(3) เติมต่อเนื่อง (Continuous Feed)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักแบบต่อเนื่องตลอดเวลา จะมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะสภาวะภายในถังหมักจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนวิธีแรกซึ่งเป็นการเติมน้ำเสียครั้งเดียว ระบบหมักจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากสภาพต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นสารอินทรีย์เป็นต้น จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงทำให้แบกทีเรียต้องปรับตัวตลอดเวลา ดังนั้นในทางปฏิบัติมักเลือกวิธีเติมแบบต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีเป็นช่วง ๆ ก็จำเป็นต้องใช้วิธีเติมแบบกึ่งต่อเนื่องแทน

014387

3.3.8 การกวนผสม

การกวนผสมน้ำในระบบหมักมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบมาก เพราะจะช่วยทำให้แบกทีเรียมีโอกาสพบสารอาหารได้ทั่วถึง นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยทำให้สภาพต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ สารอินทรีย์ ตลอดจนสารพิษกระจายทั่วกันทั้งระบบอีกด้วย การกวนผสมอาจทำได้โดยใช้เครื่องกวน ใช้เครื่องดูดก๊าซชีวภาพกลับเข้าไปในถังหมัก เพื่อกวนผสม และ/หรือ สูบน้ำหมุนเวียนในถังหมัก

3.4 รูปแบบระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนอิสระ

รูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนอิสระ สามารถแยกเป็น 2 ประเภทคือ

(1) ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบดั้งเดิม
(Conventional Anaerobic Processes)

(2) ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบประสิทธิภาพสูง
(High-Rate Anaerobic Processes)

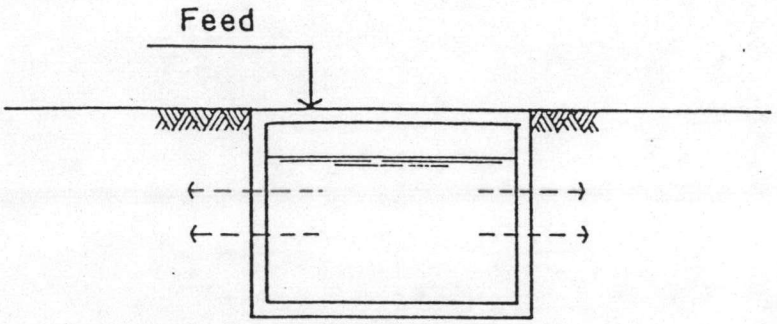
3.4.1 ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบดั้งเดิม

ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบดั้งเดิมนี้ จะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากปริมาณแบกทีเรียในระบบมีจำนวนน้อยและโอกาสสัมผัสสารอินทรีย์ก็มีน้อย แต่อย่างไรก็ตามเป็นระบบที่ง่ายต่อการควบคุมดูแล ระบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งได้แก่

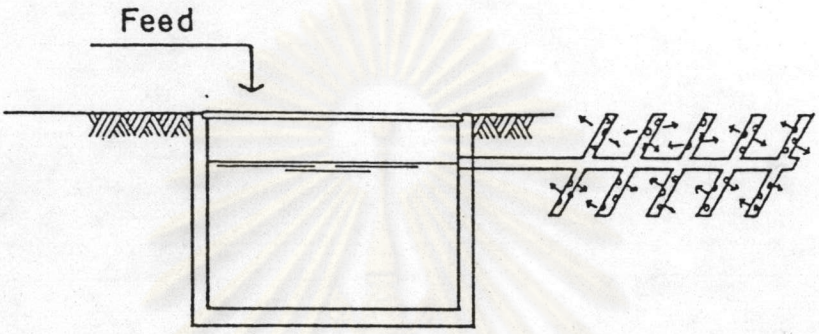
(1) Cesspool เป็นบ่อซึมแบบที่เก่าแก่ที่สุดที่ใช้กำจัดน้ำเสียชุมชน เนื่องจากเป็นบ่อที่มีขนาดเล็กและขาดการควบคุม ดังนั้นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจึง เป็นเพียง Hydrolysis สารอินทรีย์ละลายน้ำเหล่านี้จะซึมผ่านลงดิน โดยผ่านผนังบ่อ

(2) Septic tank เป็นระบบที่ออกแบบให้ทำงานคล้ายคลึงกับ Cesspool แต่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยจะมีท่อต่อจากบ่อ เพื่อให้น้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายอยู่ สามารถซึมผ่านลงดินในอัตราสูงขึ้น สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายต่อในขั้นตอน Acidogenesis และ Methanogenesis ในชั้นดิน

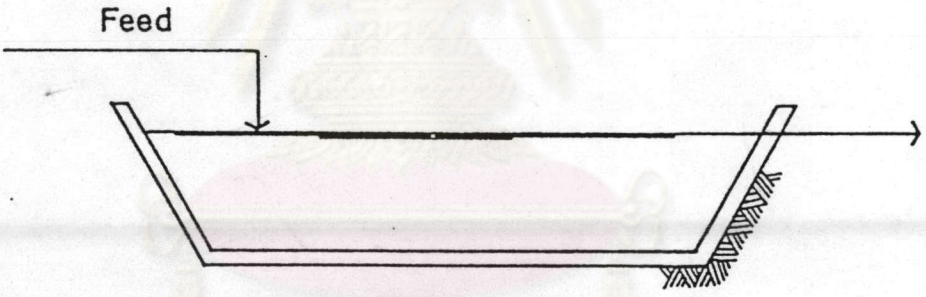
(3) Anaerobic Pond ระบบหมักแบบ Anaerobic Pond หรือบ่อหมักนี้เป็นชนิดบ่อเปิดมีความลึกตั้งแต่ 3 เมตร เพื่อป้องกันมิให้ออกซิเจนละลายลงไปถึงส่วนล่างของบ่อ โดยทั่วไปบ่อนี้มักเป็นบ่อดิน มักนิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม



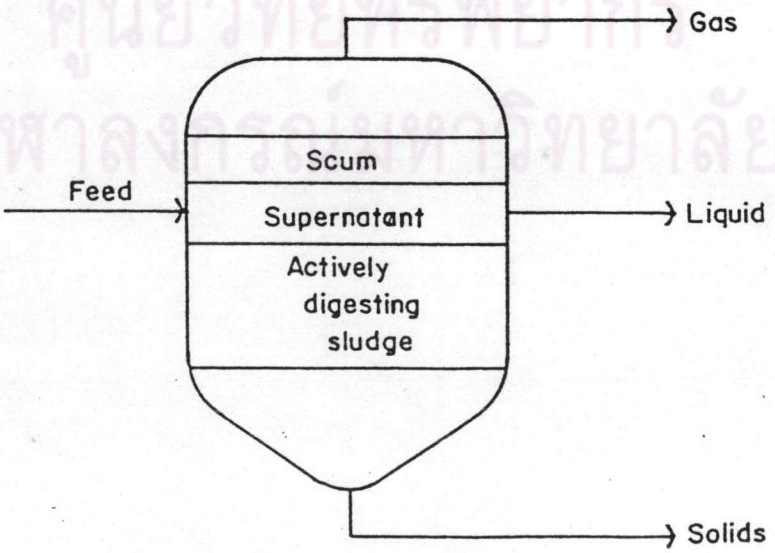
CESSPOOL



SEPTICTANK



ANAEROBIC POND



CONVENTIONAL ANAEROBIC DIGESTION

รูปที่ 3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบดั้งเดิม

ที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง และโรงงานมีพื้นที่ว่างเปล่าไม่ใช้ประโยชน์อยู่มาก ดังนั้นบ่อหมักนี้จึงง่ายไม่ยุ่งยากในการควบคุมดูแล และค่าใช้จ่ายในการบำบัดก็ต่ำด้วย ข้อเสียของระบบหมักนี้ นอกจากจะมีประสิทธิภาพต่ำ และยังมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวนแล้ว ยังสูญเสียก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานอีกด้วย ตารางที่ 3.2 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ระบบบ่อหมัก

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของบ่อหมักสำหรับน้ำเสียประเภทต่าง ๆ (13)

Industry	Area, acres	Depth, feet	Detention Time, days	Loading, lb/acre -day	BOD Removal, percent
Canning	2.5	6.0	15	392	51
Meat and poultry	1.0	7.3	16	1,260	80
Chemical	0.14	3.5	65	54	89
Paper	71	6.0	18.4	347	50
Textile	2.2	5.8	3.5	1,433	44
Sugar	35	7.0	50	240	61
Wine	3.7	4.0	8.8	-	-
Rendering	1.0	6.0	245	160	37
Leather	2.6	4.2	6.2	3,000	68
Potato	10	4.0	3.9	-	-

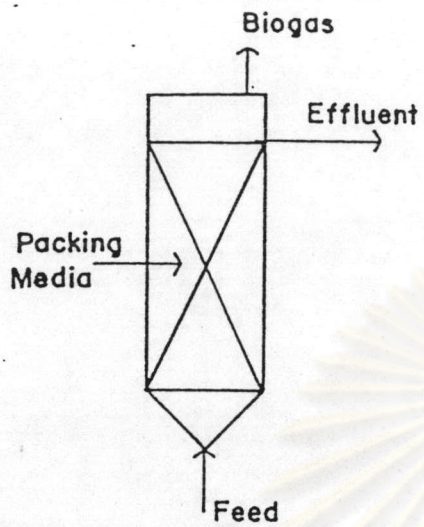
(4) Conventional Anaerobic Digester เป็นระบบหมักที่ถูกพัฒนามาใช้ในการกำจัดตะกอนแบกทีเรียที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ออกซิเจนอิสระ เช่น Anaerobic Activated sludge โดยประกอบด้วยถังหมักอาจเป็นถังเดียวหรือสองถัง ตะกอนแบกทีเรียจะถูกย่อยสลายได้ก๊าซชีวภาพ ระบบถังหมักแบบดั้งเดิมนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า Anaerobic Pond และ Septic tank แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ จึงไม่นิยมนำมาใช้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

3.4.2 ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบประสิทธิภาพสูง

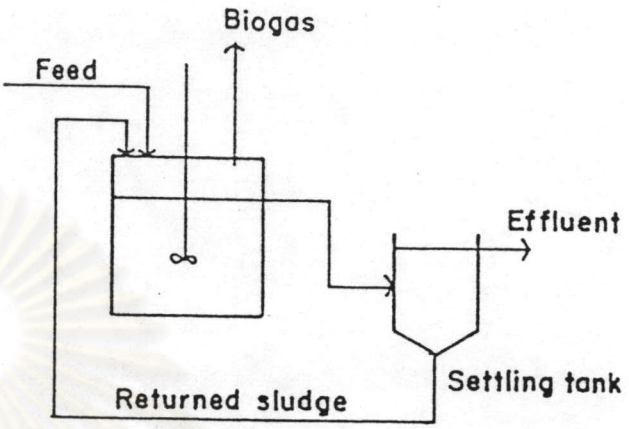
เป็นระบบหมักที่ได้รับการพัฒนาในระยะหลัง เพื่อแก้ไขปัญหาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ระบบหมักดั่งเดิมที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีประสิทธิภาพต่ำไม่เหมาะสม หลักการเพิ่มประสิทธิภาพทำได้คือ เพิ่มปริมาณแบกทีเรียในระบบ การเพิ่มปริมาณแบกทีเรียในระบบนี้ ทำได้คือ หาตัวกลางที่มีพื้นผิวสูงให้แบกทีเรียเกาะติดเป็นเมือก หรืออาจตกตะกอนแบกทีเรียที่ออกมากับน้ำล้นจากถังหมักแล้วสูบกลับลงถังหมักอีกครั้ง หรืออาจควบคุมความเร็วของน้ำเสียไหลผ่านถังหมัก (upflow velocity) ให้เหมาะสม จนเกิดเม็ดขนาดใหญ่ของแบกทีเรียจับเกาะกันแน่น (granular bacteria) ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบประสิทธิภาพสูงดังแสดงในรูปที่ 3.5 ได้แก่

(1) Anaerobic Filter เป็นระบบหมักที่ประกอบด้วยถังหมักมักมีรูปทรงสูง ภายในจะบรรจุด้วยตัวกลางพลาสติก ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (high specific surface area) แบกทีเรียจะเกาะเป็นเมือกหนาบนผิวตัวกลาง ดังนั้นปริมาณแบกทีเรียในถังหมักจึงสูงมากเมื่อเทียบกับระบบเดิม น้ำเสียอาจเติมเข้าช่วงบนหรือช่วงล่างของถังหมักก็ได้ ถึงแม้ว่าระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ราคาค่าก่อสร้างระบบก็สูงเช่นกัน เนื่องด้วยราคาตัวกลางพลาสติกมีราคาสูง ดังนั้นระบบนี้จึงเหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียไม่สูงนัก ตารางที่ 3.3 แสดงประสิทธิภาพระบบ Anaerobic Filter ในการบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ

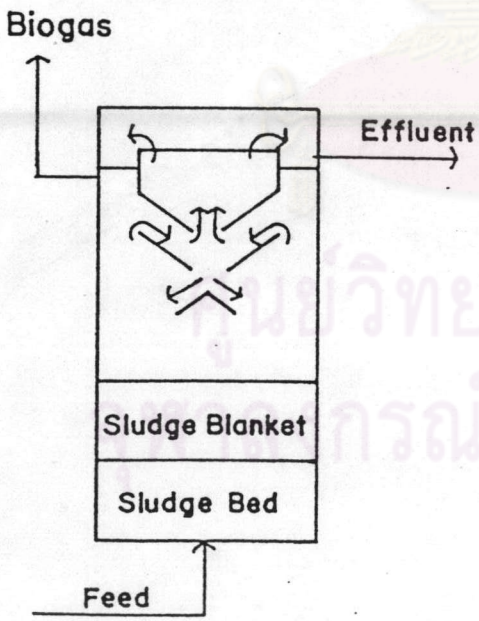
(2) Anaerobic Contact Process ระบบหมักนี้มีความคล้ายคลึงกับระบบเลี้ยงตะกอน (activated sludge) แต่ Anaerobic Contact Process จะปิดหมดจึงอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ กล่าวคือ แบกทีเรียที่ออกมาพร้อมกับน้ำที่ล้นจากถังหมักจะไหลลงถังตกตะกอน ตะกอนแบกทีเรียจะถูกสูบกลับเข้าสู่ถังหมัก ดังนั้นแบกทีเรียในถังหมักจะมีจำนวนสูงมาก กล่าวคือ มีค่า MLSS สูงถึง 20,000 มก./ล. ประสิทธิภาพโดยทั่วไปจะสูงเทียบเท่าระบบ Anaerobic Filter ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ข้อแตกต่างระหว่างระบบทั้งสองคือระบบ Anaerobic Contact Process นี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าและยุ่งยากกว่าระบบ Anaerobic Filter เนื่องจากต้องมีเครื่องสูบตะกอนแบกทีเรีย และเครื่องกวนถังหมัก แต่ค่าก่อสร้างระบบ Anaerobic Contact Process จะต่ำกว่าระบบ Anaerobic Filter เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวกลางพลาสติกในถังหมักดังเช่นระบบ Anaerobic Filter



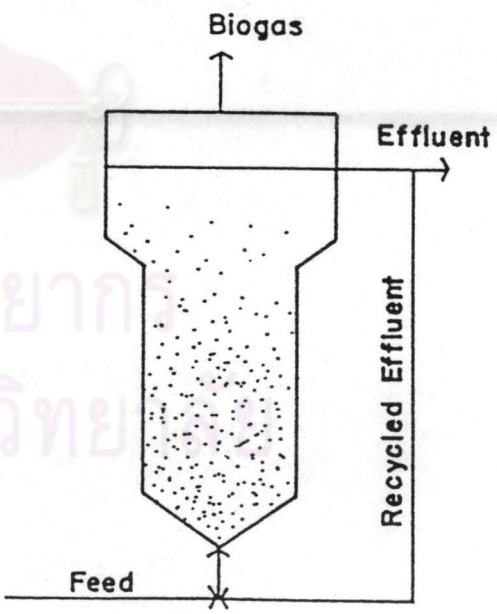
Anaerobic Filter



Anaerobic Contact Process



Upflow Anaerobic Sludge Blanket



Anaerobic Fluid Bed

รูปที่ 3.5 ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพระบบ Anaerobic Filter ขั้นห้องปฏิบัติการ(14)

Type of waste	Digestion temperature (°C)	Hydraulic retention time (d)	Parameter	Influent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Percentage removal
Raw domestic sewage ..	4	1.5	BOD	180	40-90	67
" ..	25	1.5	"	180	10-35	82
" ..	25	1.5	SS		9	>95
Protein carbohydrate ..	25	0.75	COD	1,500	122	91.5
..	25	0.375	"	1,500	312	79.3
" ..	25	0.187	"	1,500	950	36.7
" ..	25	3.00	"	3,000	204	93.4
" ..	25	1.50	"	3,000	347	88.4
" ..	25	0.375	"	3,000	1,100	63.0
Volatlle acids	25	1.5	COD	1,500	24	99.4
"	25	0.75	"	1,500	139	90.5
"	25	0.375	"	1,500	314	79.0
"	25	3.0	"	3,000	42	98.6
"	25	1.5	"	3,000	240	92.0
"	25	1.5	"	6,000	139	97.7
"	25	0.75	"	6,000	794	86.9
Food processing	35	3.56	COD	8,475	546	93.5
"	35	3.56	BOD	5,200	975	81.4
"	35	3.56	Org.C	2,400	115	95.2
"	35	3.56	SS	1,508	455	70.0
"	35	0.54	COD	8,475	5,000	41.0
"	35	0.54	BOD	5,200	3,800	25.2
"	35	0.54	Org.C	2,400	1,720	28.3
"	35	0.54	SS	1,508	1,855	-

ตารางที่ 3.4 ประสิทธิภาพระบบ Anaerobic Contact Process(14)

Type of waste	Scale of plant	Digestion temperature (°C)	Hydraulic retention time (d)	Parameter	Influent (mg/l)	Effluent (mg/l)	Percentage removal
Slaughterhouse ..	Laboratory	33	0.69	BOD	1,500	100	93
" ..	"	33	2.94	"	1,500	84	94
"	Pilot	33	1.25	BOD	2,100	90	96
"	"	33	1.25	Org.C	940	92	90
Meat packing	Pilot	35	0.5	BOD	1,600	80	95
"	Full	32	0.54	"	1,380	130	91
"	"	32	0.34	SS	990	200	80
Maize-starch	Full	Ambient	3.3	BOD	6,280	755	88
"	"	"	3.3	Org.C	3,250	317	90
"	"	"	3.3	VS	6,556	623	90
Brewery	Pilot	Not stated	2.23	BOD	3,280	130	96
Distillery	Full	30	7.2	COD	22,400	540	98
"	"	30	5.3	"	12,600	400	97
"	Laboratory	33	6.2	BOD	25,000	986	96
"	"	33	6.2	Org.C	12,000	1,812	85
"	Laboratory	35	0.92	BOD	845	60	93
"	"	35	0.92	TS	1,820	850	53
Citrus	Laboratory	34	1.38	BOD	2,670	130	95
"	Pilot	34	2.32	"	3,440	1,100	68
Yeast	Laboratory	30	2	BOD	3,042	391	87
"	Pilot	30	1.7	"	5,076	761	85
Chewing gum	Full	Not stated	11.7	BOD	1,840	740	60
Milk	Laboratory	31	6	BOD	3,300	10-20	99.5
"	"	31	6	"	380	20-50	90
"	"	31	6	VS	3,750	260	93
"	"	31	6	"	310	140	55

(3) Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) เป็นระบบหมักที่ได้รับการพัฒนาใหม่ และนำไปใช้กับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท หลักการทำงานของระบบดังแสดงในภาพที่ 3.5 น้ำเสียจะถูกสูบเข้าก้นถังหมักที่ความเร็วที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำให้แบกทีเรียเกาะจับกันแน่นเป็นเม็ดขนาดเล็ก 1-5 มม. มีความหนาแน่นสูงมาก อยู่เป็นชั้นหนา ข้างล่างถังหมักถัดขึ้นมาจากชั้น Granular bacteria จะเป็นชั้นของแบกทีเรียที่เป็นลักษณะเป็นตะกอนเบา (floc) ช่วงบนของถังจะมีกรวยแยกตะกอน น้ำใสเท่านั้นที่ไหลล้นออกจากถังหมัก ดังนั้นถังหมักจึงมีแบกทีเรียปริมาณสูงในระบบตลอดเวลา จึงทำให้มีประสิทธิภาพระบบสูงกว่าระบบ Anaerobic Filter และ Anaerobic Contact Process ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่ต้องสร้างถังตกตะกอน ดังเช่น สองระบบแรก และไม่ต้องมีเครื่องกวนดังเช่นระบบ Anaerobic Contact process ค่าก่อสร้างระบบจะใกล้เคียงกับระบบ Anaerobic Contact Process ข้อเสียของระบบนี้คือ ยังเป็นระบบใหม่จึงขาดข้อมูลเทคนิค และการออกแบบจะมีความยุ่งยากกว่าระบบอื่น คือต้องออกแบบระบบกระจายน้ำเสียเป็นพิเศษ (feed distributors) ตารางที่ 3.5 แสดงประสิทธิภาพของระบบ UASB สำหรับน้ำเสียประเภทต่าง ๆ

(4) Anaerobic Fluid Bed เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถควบคุมให้จำนวนแบกทีเรียในระบบคิดในรูป MLSS สูงถึง 15,000-40,000 มก./ล. โดยแบกทีเรียจะเกาะเป็นเมือกคลุมผิวตัวกลางที่เป็นเม็ดขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 มม.) น้ำเสียจะถูกสูบเข้าก้นถังหมักที่มีทรงสูงด้วยความเร็วสูงพอเหมาะ โดยสามารถยกเม็ดตัวกลางให้ลอย ดังนั้นการเคลื่อนที่ของเม็ดตัวกลางมากมายเหล่านี้จะเหมือนของเหลว คือ เคลื่อนที่ไปทุกทิศทาง จึงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลทั้งอาหารและของเสียต่าง ๆ จากปฏิกิริยาชีวเคมีสูงมาก ส่วนบนของถังหมักจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างขึ้น ดังนั้นความเร็วน้ำ (upflow velocity) จะต่ำลง จึงทำให้เม็ดตัวกลางที่มีเมือกแบกทีเรียอยู่จะตกลงมา น้ำใสเท่านั้นที่ล้นออกจากถังหมัก และเนื่องจากเม็ดตัวกลางเคลื่อนไหวไปมาอย่างอิสระ ดังนั้นจึงเกิดการขัดสีและชนกันตลอดเวลา ทำให้เมือกแบกทีเรียหลุดออกตลอดเวลา จึงเป็นการควบคุมความหนาของเมือกแบกทีเรีย เมือกแบกทีเรียที่หลุดติดไปกับน้ำเสียที่บำบัดแล้วจะต้องแยกออกโดยไหลผ่านถังตกตะกอน ถึงแม้ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ตาม แต่เป็นระบบที่ยุ่งยากในการควบคุมและค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงอีกด้วย จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายแต่อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวเริ่มมีความสำคัญมากขึ้น โดยเริ่มมีหลายบริษัทได้ผลิตอุปกรณ์ระบบดังกล่าวจำหน่ายขั้นอุตสาหกรรม ตารางที่ 3.6 แสดงประสิทธิภาพระบบ Anaerobic Fluid Bed.

ตารางที่ 3.5 ประสิทธิภาพระบบ UASB สำหรับน้ำเสียประเภทต่าง ๆ (15)

Type of waste	UASB reactor (m^3)	Influent characteristics		Maximum Applied organic ($kgCOD^a/m^3/day$)	loading rates Hydraulic ($m^3/m^3/day$)	Temp. (°C)	Treatment efficiency based on:		
		COD range[a] (mg/litre)	Fraction soured (%)				$E_{CODcentr}$[b] (%)	$E_{CODdoss}$[c] (%)	$F_{BODcentr}$ (%)
Liquid sugar	6	4,000-6,000	15-25	20-25	4	28-32	92-95	93-98	-
Campaign sugar beet waste	6	3,500-4,000	75	30-32	4-6	28-32	95-80	95-98	-
Campaign sugar beet waste	200	4,000-5,200	70-90	14-16	3-4	30-34	87-95[d]	-	90-95
Potato processing	6	2,000-5,000	25	3-5	1.2	19	95(92)[d]	-	94
(Lime used as	6		30	10-15	3	26	95(89)	-	98
neutralising	6		12	15-18	4	30	95(89)	-	97
agent)	6	4,000-16,500	8	25-45	6-7	35	93(89)	-	96
Potato processing	50	10,000-12,000	78-83	7	0.6	30-35	91-97	-	-
Slaughterhouse	30	1,500-2,200	-	10	-	30	-	87	-
		1,500-2,200	-	6	-	20	-	91	-
Raw Sewage	120	200-900	-	0.7-2.7	-	8-20	54-72	60-89	-

[a] COD values based on centrifuged samples for sugar beet wastes.

[b] $E_{CODcentr}$: based on centrifuged effluent samples and raw influent COD values.

[c] $E_{CODdiss}$: based on centrifugedinfluent COD values and effluent COD values determined after flocculation of the sample with 200 $mgFe^{3+}$/litre.

[d] Values in parentheses refer to effluent samples which have been allowed to settle for 30 min.

ตารางที่ 3.6 ประสิทธิภาพระบบ Anaerobic Fluidized Bed สำหรับน้ำเสียต่าง ๆ

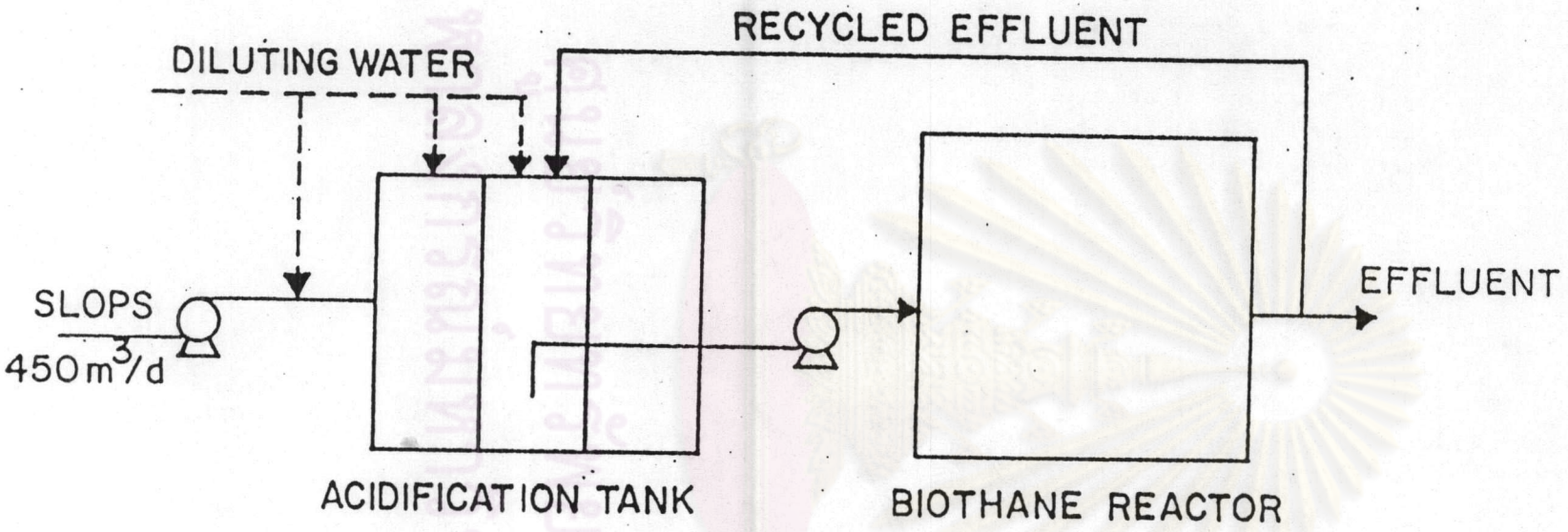
Type of waste	Influent		Temp. °C	HRT hr	Loading		% COD Removal	%BOD Removal	CH_4 Production l/d	Remark
	BOD mg/l	COD mg/l			kg_3 COD/ m^3 d	kg BOD / m^3 d				
Soy Processing waste	4,835	-	363	11.8	9.3	19.7	-	89	205	Pilot Plant
	6,356	-	36	20.2	7.8	13.0	-	82	135	
Wheat Permeate	-	7,826	30-35	15.4-22	8.5-12.2	-	63	-	-	"
	-	6,444	30-35	14.9-16.1	9.6-10.4	-	68	-	-	"
Yeast-alcohol waste	-	-	-	1-1.5	52.6	-	43	-	275	Commercial scale
				1.5-2.0	5.6	-	48.4	-	100	"

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะเห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนอิสระแบบประสิทธิภาพสูงนั้นมีความสำคัญมากขึ้นกว่าแต่ก่อน เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ในระยะช่วง 10 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย ได้ทำการทดลองศึกษาแยกระบบหมักกรดอินทรีย์ออกจากระบบหมักมีเทน เนื่องจากแบกทีเรีย 2 กลุ่มนี้มีความต้องการสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน ดังนั้นการแยกเป็น 2 ขบวนการย่อยในระบบหมักจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว ตัวอย่างเช่น ระบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket, Anaerobic Contact Process, และ Anaerobic Fluid Bed ได้มีการออกแบบเป็นสองขั้นตอน ดังนั้นสำหรับประเทศไทยระบบ 2 ขั้นตอน ถังหมักแบบประสิทธิภาพสูงจะมีการนำมาใช้มากขึ้นในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม รูปที่ 3.6 แสดงระบบ UASB สองขั้นตอนที่ออกแบบสำหรับบำบัดน้ำกากส่าจากโรงงานสุรากรมสรรพสามิตทั้ง 12 แห่ง น้ำกากส่ามีความเข้มข้น ซีโอดี 100,000 มก./ล. และบีโอดี 35,000 มก./ล. ถังใบแรกซึ่งเป็นถังหมักกรดอินทรีย์ มีปริมาตรบรรจุ 450 ม.^{3} ใช้เวลาในการกำจัด 1 วัน ถังหมักใบที่สองเป็นถังหมักมีเทน มีปริมาตรบรรจุ 3,000 ม.^{3} ใช้เวลาในการกำจัด 6.7 วัน คาดว่าเมื่อระบบทำงานอยู่ในสภาวะคงที่สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ 15 กก.ซีโอดี/ม.^{3}- วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 70% โดยมีอัตราการสูบน้ำกากส่าเข้าถังหมักทั้งสองใบคงที่เท่ากับ 450 ม.^{3}/วัน

3.5 ลักษณะการทำงานของระบบหมักแบบสองขั้นตอน

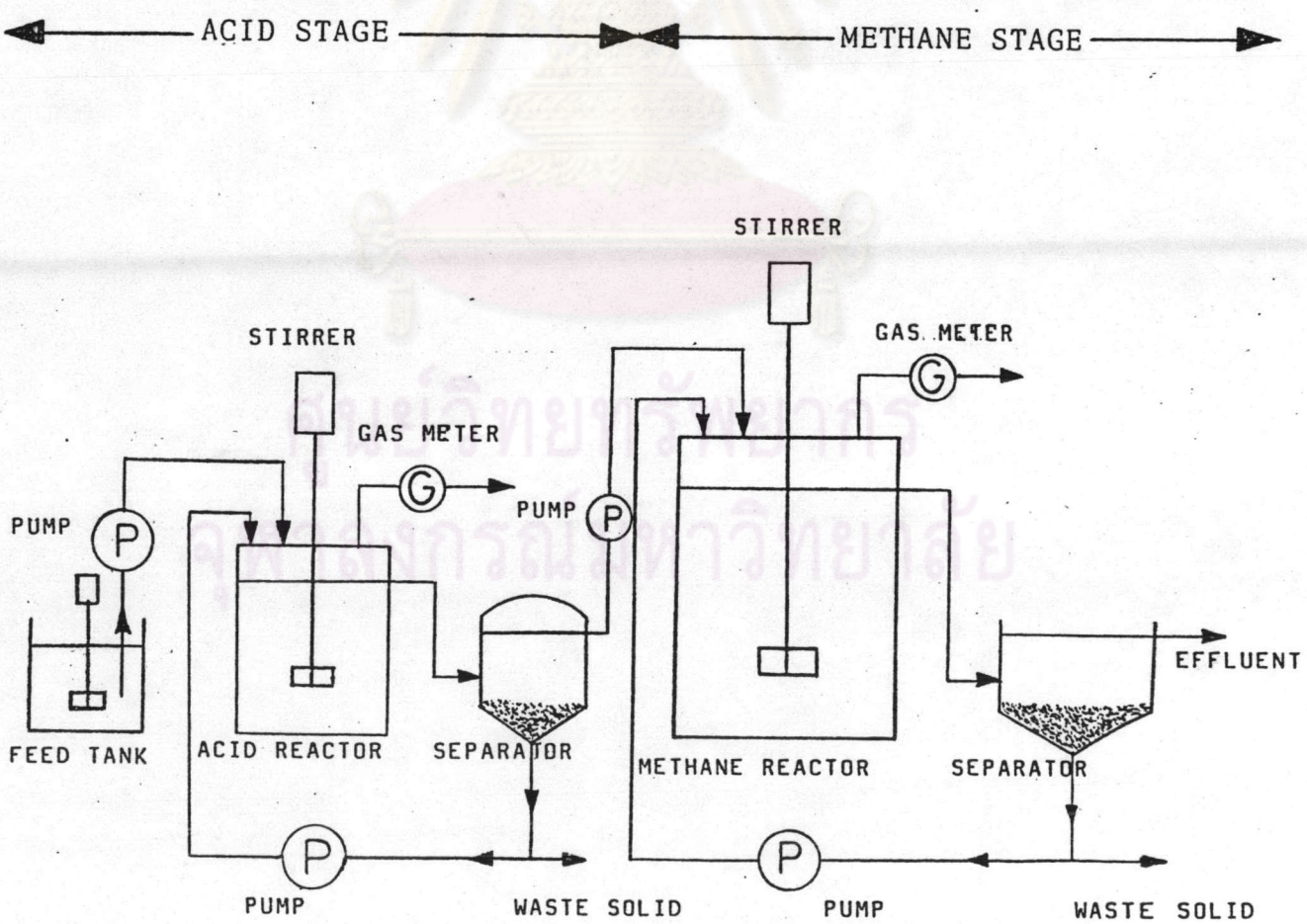
ดังได้กล่าวมาแล้ว ระบบหมักเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ ประกอบด้วยปฏิกิริยาชีวเคมี แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ Hydrolysis, Acidogenesis และ Methanogenesis อัตราการย่อยสลายในขั้นตอน Methanogenesis ช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogenesis ดังนั้น ในถังหมักทั่วไป ซึ่งเป็นการหมักแบบขั้นตอนเดียว กล่าวคือมีถังหมักเพียงถังเดียว ปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอนจะเกิดขึ้นในถังหมักพร้อมกัน ปฏิกิริยาชีวเคมีของการหมักจึงถูกควบคุมด้วยขั้นตอน Methanogenesis ในทางปฏิบัติที่กระทำกันก็คือ การควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ไม่ให้สูงจนเกินไป เพราะถ้าสูงจนเกินไปแล้วจะทำให้เกิดการสะสมของปริมาณกรดอินทรีย์ในระบบ อันเนื่องมาจากแบกทีเรียพวกสร้างมีเทนมีอัตราการใช้กรดอินทรีย์ต่ำ กว่าอัตราการเกิดกรดอินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้พีเอชในระบบลดต่ำลง ซึ่งเป็นอันตรายต่อแบกทีเรียพวกสร้างมีเทน และระบบทำงานล้มเหลวในที่สุด



UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET

รูปที่ 3.6 ระบบ UASB แบบสองขั้นตอนสำหรับน้ำกากส่าโรงงานสุรา กรมสรรพสามิต

การแยกระบบหมักออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนของการหมักกรดอินทรีย์ และขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนของการหมักมีเทนตามรูปที่ 3.7 ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้สูงขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากแบกทีเรียพวกสร้างกรด และแบกทีเรียพวกสร้างมีเทนในถังหมักที่แยกออกจากกันนั้นจะสามารถถูกควบคุมให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทำงาน สำหรับแบกทีเรียแต่ละพวก โดยน้ำเสียจะถูกสูบเข้าสู่ถังหมักกรดอินทรีย์ก่อน จากนั้นน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักกรดอินทรีย์โดยผ่านถังตกตะกอนจึงถูกสูบเข้าสู่ถังหมักมีเทน เพื่อการกำจัดสารอินทรีย์และผลิตก๊าซมีเทนต่อไป ถังหมักมีเทนนี้ต้องมีขนาดใหญ่กว่าถังหมักกรดอินทรีย์ เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยสลายในขั้นตอนของการหมักมีเทนช้ากว่าในขั้นตอนของการหมักกรดอินทรีย์ดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 3.7 ระบบหมักแบบสองขั้นตอน

3.6 การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้ทำมาแล้ว

Ghosh และคณะ (16, 17, 18, 19, 20, 21) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่ได้ทำการศึกษาทดลองระบบหมักแบบสองขั้นตอนขึ้น ห้องปฏิบัติการ ซึ่งสรุปผลได้ว่า ระบบหมักแบบสองขั้นตอนดีกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว กล่าวคือ ปี 1975 Ghosh และคณะ ได้ทำการศึกษาการหมักแบบสองขั้นตอน โดยการแยกแบกทีเรียพวกสร้างกรดและแบกทีเรียพวกสร้างมีเทนออกจากกัน โดยการควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสม ซึ่งสรุปได้ผลว่า ในถังหมักกรด เวลาในการกำจัดที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 24 ชั่วโมง และค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 31.92 ถึง 80.16 กก.VS/ม.^{3}- วัน โดยการทดลองนี้ใช้เวลาในการกำจัดในถังหมักมีเทนคงที่ ที่ 6.46 วัน ซึ่งดีกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวที่ต้องใช้เวลาในการกำจัดถึง 14 วัน หรือมากกว่า

ในปี 1982 Ghosh และคณะ ทำการทดลองระบบหมักแบบสองขั้นตอนเปรียบเทียบกับ ระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่ม ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบหมักแบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว กับระบบหมักแบบสองขั้นตอน จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (21)

	Single-Stage	Two-Stage*
COD Loading ;kg/m^3.d	0.8	6.1
Hydraulic Retention Time ;days	15	7.4
COD Removal ; %	84	96
Gas Production Rate ;m^3/m^3.d	0.4	2.9
% Methane	61	71
Methane Yield ;m^3/kg COD added	0.5	0.48
Effluent VFA	180	450

* First - stage was CSTR and second stage was anaerobic filter

การเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ สูงกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว แต่จะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนต่ำกว่า และปริมาณกรดอินทรีย์ที่ออกจากระบบสูงกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมองถึงประโยชน์ของการใช้งานจริง ระบบหมักแบบสองขั้นตอนดีกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว กล่าวคือ สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่า และใช้เวลาในการกำจัดน้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่ง

Breure และ Andel (22) ได้กล่าวสรุปว่า สำหรับการย่อยสลายสารโปรตีนไปเป็นก๊าซชีวภาพนั้น ระบบหมักแบบสองขั้นตอนดีกว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว

ได้มีการศึกษาทดลองการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม (palm oil mill effluent) พบว่าระบบหมักแบบสองขั้นตอนให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงขึ้น ทั้งยังมีเสถียรภาพดีกว่าระบบหมักธรรมดา ซึ่งเป็นแบบขั้นตอนเดียว (23)

Ku Jie-quan และคณะ (24) ทำการศึกษาขั้น Pilot scale ของระบบหมักแบบสองขั้นตอน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร ระบบหมักที่ใช้ทดลองประกอบด้วยถังหมักกรด มีความจุ 1.97 $ม^3$ และถังหมักมีเทน มีความจุ 3.18 $ม^3$ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ก๊าซมีเทนส่วนใหญ่เกิดจากถังหมักมีเทน และพบว่าถังหมักมีเทนมีจำนวนแบกทีเรียพวกสร้างมีเทนสูงกว่าในถังหมักกรดถึง 10^4 เท่า

ได้มีการศึกษาทดลองระบบ UASB แบบสองขั้นตอน สำหรับบำบัดน้ำปฏิกูล (night soil)(25) จากผลการทดลองพบว่า ระบบ UASB แบบสองขั้นตอน สามารถบำบัดน้ำปฏิกูลโดยไม่ต้องเจือจางด้วยน้ำ โดยระบบสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 12 กก.ซีโอดี/$ม^3$- วัน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ถึง 85 % แต่สำหรับระบบ UASB แบบขั้นตอนเดียวนั้น จำเป็นต้องเจือจางน้ำปฏิกูลก่อนสูบเข้าระบบ

Lettinga (26) ผู้ค้นคิดระบบ UASB เน้นว่าสำหรับน้ำทิ้งที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ในรูปของแข็ง จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอน

สุรพล สายพานิช (27) ได้วิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยกระบวนการตะกอนเร่งคอนแทค - สเตบิไลเซชั่นแบบแอนแอโรบิค โดยใช้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 5.8 กก.ซีโอดี/ม^3- วัน พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 74 % และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นประมาณ 0.315ม^3/กก.ซีโอดีที่ถูกทำลายไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย