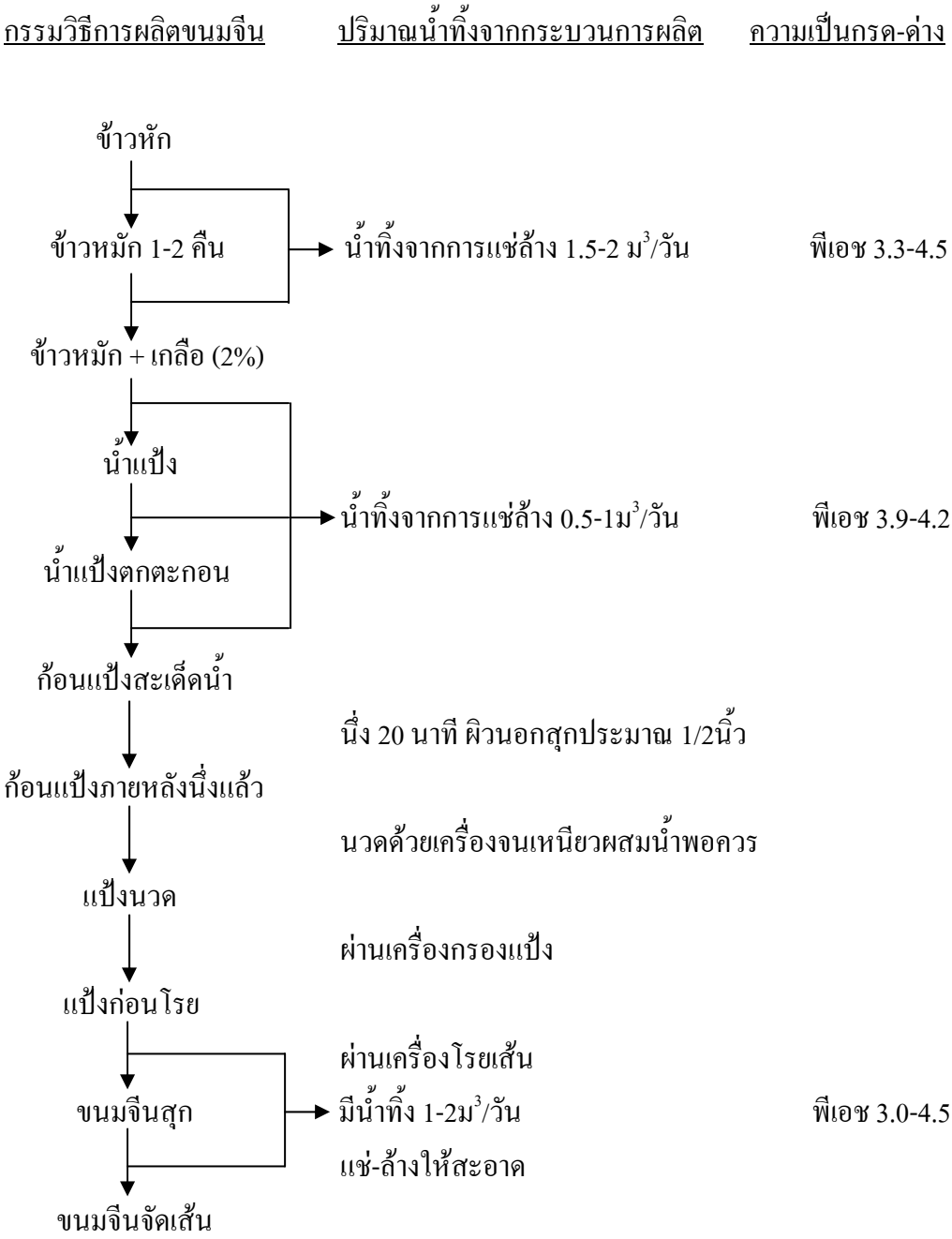
การตรวจเอกสาร

1. น้ำเสียจากการผลิตเส้นขนมจีน

การผลิตเส้นขนมจีน ใช้วัตถุดิบหลักคือ ปลายข้าวหรือข้าวหัก ซึ่งเป็นอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต จากขั้นตอนการผลิตนั้น ต้องใช้น้ำจำนวนมากในกระบวนการผลิต คือใช้น้ำในการล้างทำความสะอาด การแช่ข้าว การโม่เปียก การต้มน้ำ การนึ่ง และการล้างเครื่องอุปกรณ์การผลิต นอกจากนั้นยังมีการใส่สารเคมีเพื่อเพิ่มคุณภาพในการผลิต ซึ่งสารเคมีที่ใช้ได้แก่ เกลือ น้ำเสียที่ใช้ในกระบวนการผลิต จะถูกทำให้ไหลมารวมกัน แล้วไหลลงสู่ระบบบำบัดของแต่ละโรงงาน ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัดจะมีลักษณะสีขาวขุ่น มีกลิ่นเหม็น จากการศึกษาโครงการการจัดการน้ำเสียอุตสาหกรรมครัวเรือน ของวันเพ็ญและคณะ (2542) พบว่า โรงงานผลิตขนมจีนเป็นโรงงานที่มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นจากแป้งหมัก และน้ำทิ้ง ซึ่งมีค่า บีโอดี สารแขวนลอยค่อนข้างสูง จากการสำรวจโรงงานผลิตขนมจีนในเขตเทศบาลนครขอนแก่น ซึ่งมีอัตราการผลิตขนมจีนวันละ 200-300 กก./โรงงาน พบว่ามีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต 3-5 ลบ.ม./วัน ซึ่งเกิดจากน้ำแช่ข้าวประมาณ 1.5-2 ลบ.ม. น้ำล้างโม่ประมาณ 0.5-1 ลบ.ม. ส่วนน้ำอีกประมาณ 1-2 ลบ.ม. มาจากการล้างและการจับเส้น น้ำจากการผลิตมีค่าความสกปรกเนื่องจากสารอินทรีย์จำพวกแป้งค่อนข้างสูง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรรมวิธีการผลิตขนมจีน พร้อมทั้งแสดงปริมาณน้ำเสียและความเป็นกรด-ด่างในขั้นตอนการผลิต

ที่มา: วันเพ็ญ และคณะ (2542)

วันเพ็ญ และคณะ (2542) ได้ศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศ 4 บ่อ ต่อแบบอนุกรม สร้างจากวงกลมคอนกรีตสำเร็จรูป เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 0.5 เมตร บ่อหมักแต่ละบ่อใช้วงกลมสำเร็จรูป 5 วง เป็นที่เก็บน้ำ 4 วง โดยศึกษาน้ำเสียจากโรงงานขนมจีนบ้านยางหย่อง อ.เมือง จ.ขอนแก่น พบว่า น้ำเสียเมื่อผ่านระบบบ่อหมักไร้อากาศ 4 บ่อ ระบบดังกล่าวสามารถลดบีโอดีของน้ำเสียจากขั้นตอนการแช่ข้าวและการล้างโม่ได้ร้อยละ 64.71 และลดซีโอดีได้ร้อยละ 43.11 ทั้งนี้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ออกแบบ (มากกว่าร้อยละ 80) อาจเนื่องมาจากผู้ประกอบการมิได้เอาใจใส่เพื่อให้ระบบใช้งานได้ดีอยู่เสมอ ซึ่งพบว่ามีตะกอนแป้งซึ่งทับถมอยู่ในบ่อหมักจึงทำให้ความลึกของบ่อลดลงส่งผลให้ปริมาตรบ่อลดลงด้วย เป็นเหตุให้ระยะเวลากักเก็บในบ่อหมักลดลงจุลินทรีย์จึงมีระยะเวลาไม่เพียงพอในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพลดลงด้วย ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งจากบ่อหมักไร้อากาศ 4 บ่อของโรงงานขนมจีนบ้านยางหย่อง

บ่อที่	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	สารแขวนลอย (มก./ล.)
1	3.98	28	3,060	5,567.8	645
2	4.13	30	2,460	5,128.2	225
3	4.48	30	1,260	4,981.7	205
4	4.68	30	1,080	3,223.4	120

ที่มา: วันเพ็ญ (2542)

2. ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการย่อยไร้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าเป็นแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนล้วนมีกลไกพื้นฐาน ร่วมกัน กล่าวคือทั้งคู่เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน–รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีด๊อกซ์ ซึ่งหมายความว่า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเลคตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเลคตรอน (Electron Donor) และ สารรับอิเลคตรอน (Electron Acceptor) โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเลคตรอนและสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ตัวอื่นที่อยู่ในน้ำจะเป็นสารรับอิเลคตรอน สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน สารรับอิเลคตรอนก็คือออกซิเจน

ถ้าสารรับอิเลคตรอนเป็นสารคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาจะเป็นแบบไร้ออกซิเจนกระบวนการการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน มีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนคือ

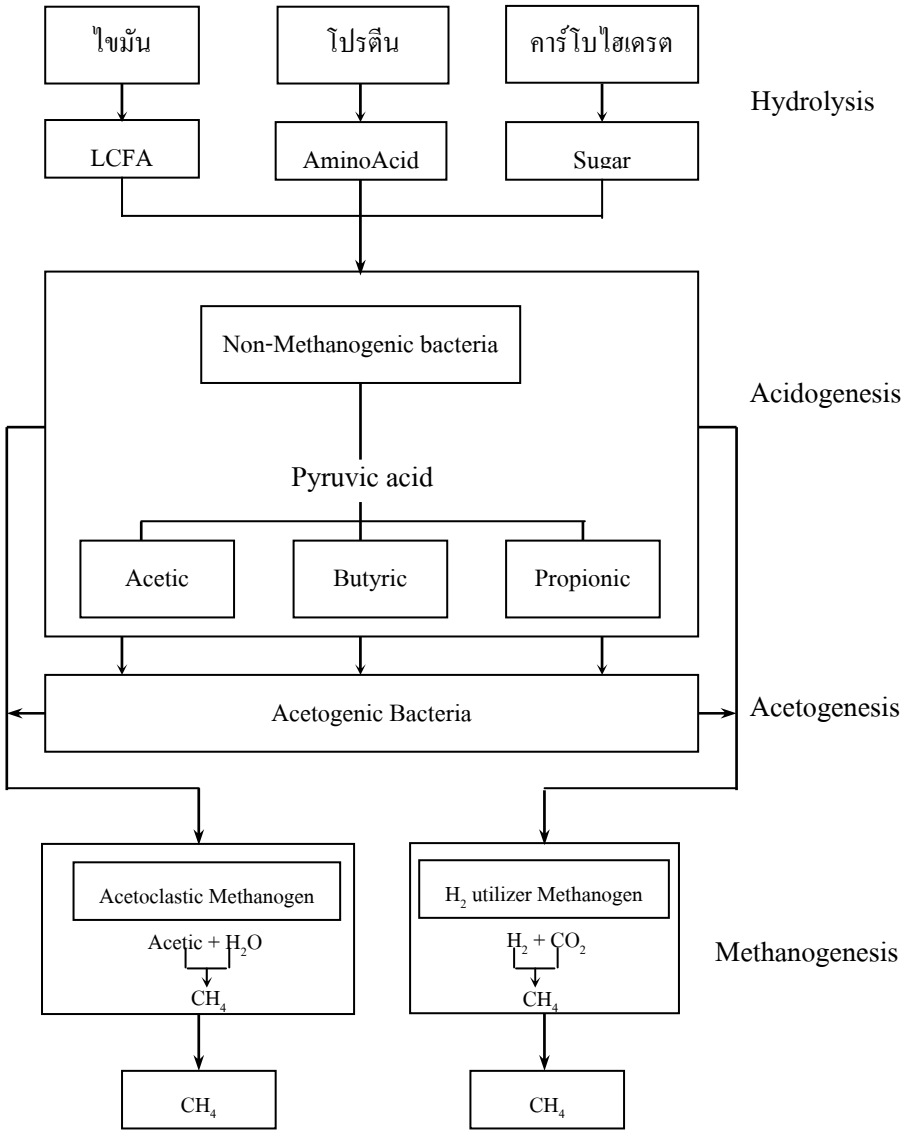
1. ไม่มีออกซิเจนอิสระซึ่งเป็นสารรับอิเลคตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง
2. ได้ผลสุดท้ายของปฏิกิริยาคือ ก๊าซมีเทน
3. มีอัตราการสร้างตะกอนจุลินทรีย์ต่ำมาก
4. มีเสถียรภาพระหว่างกลุ่มจุลชีพต่ำ
5. ไม่อาจลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมากๆ ได้
6. ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ

3. ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน เป็นการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีออกซิเจนอิสระ ถ้ามีออกซิเจนอิสระจะทำให้ความสามารถในการทำงานของกระบวนการลดลง ขั้นตอนการทำงานสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)
2. ขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis)
3. ขั้นตอนการสร้างกรดอะซีติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)
4. ขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนทั้ง 4 ต้องอาศัยแบคทีเรีย 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างอะเซเตท แบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยมีวิถีการเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนของไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตหรือแป้งดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการย่อยสลายไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตแบบไร้ออกซิเจน

3.1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซีสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้เป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดห่วงโซ่คาร์บอนยาวตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาภายนอกเซล (Extracellular Enzyme) โดยแบคทีเรียหลายจำพวกมักเป็นแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic) ทำให้ได้สารโมเลกุลเล็กลงเพื่อให้แบคทีเรียสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลได้ การย่อยสลายของขั้นตอนนี้มักขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย โดยเอนไซม์จะไปลดพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม เอนไซม์มีความเฉพาะเจาะจงมาก โดยจะเลือกเร่งเฉพาะชนิดของปฏิกิริยาและชนิดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ การทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์และสารอินทรีย์ เป็นต้น

3.2 ขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis)

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปในเซลล์ เพื่อใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น อะเซติก บิวไทริก โพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย กระบวนการทางชีวะเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารอาหาร (substrate) และความดันย่อยของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะเซติกและไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นบิวไทริกและโพรไพโอนิก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันย่อยสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะเซติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านขั้นตอนในกระบวนการ Embden-Meyerhof ที่สภาวะไฮโดรเจนมีความดันย่อยต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 3a หากไฮโดรเจนมีความดันย่อยสูงผลผลิตที่ได้คือ กรดอะเซติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในภาพที่ 3b

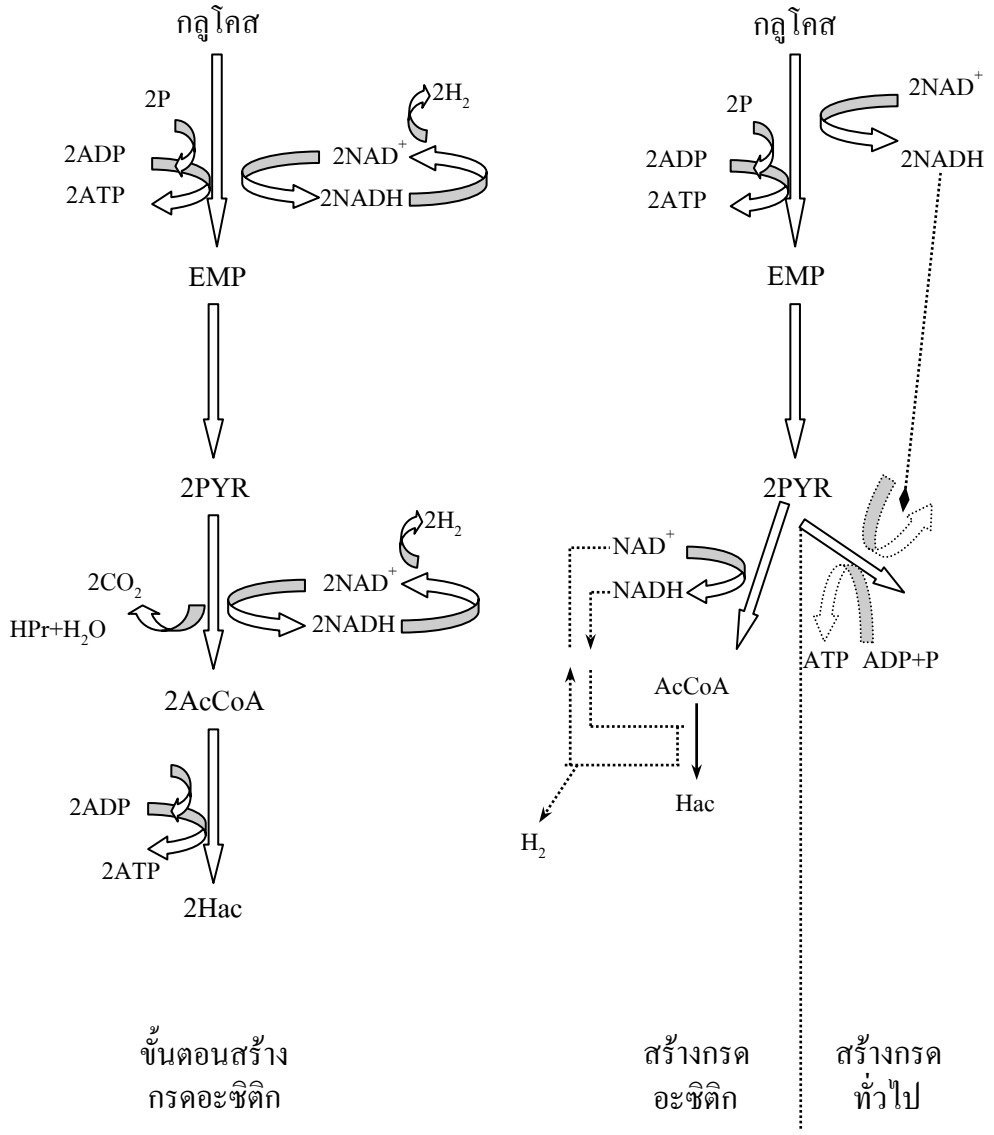
3.3 ขั้นตอนการสร้างกรดอะเซติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

แบคทีเรียอะเซโตจีนิก (แบคทีเรียสร้างอะเซเตท) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสับสเตรตเฉพาะเจาะจงมากได้แก่ กรดอะเซติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทธานอล และเมทธิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่อาจใช้เป็นสับสเตรตในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะเซโตจีนิก (ที่สร้างไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะเซติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ที่สภาวะไฮโดรเจนมีความดันย่อยต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ ดังแสดงในสมการที่ (1) ส่วนในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันย่อยต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ กระบวนการย่อยสลายกรดบิวไทริก และกรดโพรไพโอนิกจะถูกย่อยสลายต่อไป ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$CH_3CH_2COOH \text{ (propionic acid)} + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \qquad (1)$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH \text{ (butyric acid)} + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \qquad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันย่อยต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะเซติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันย่อยสูง



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาการสร้างกรดไขมันระเหยใต้สภาวะที่ความดันย่อยของไฮโดรเจนมีค่าสูงและต่ำ
ที่มา: มั่นสิน (2542)

3.4 ขั้นตอนการสร้างมีเทน

กรดอะเซติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

$$CH_3COOH + H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2CO_3 \quad (3)$$

$$4H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \quad (4)$$

กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะเซติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะเซติกและไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สับสเตรตอย่างง่ายอีกไม่กี่ชนิดในการสร้างมีเทน เช่น เมทธานอล และกรดฟอร์มิก

$$4CH_3OH \longrightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O \quad (5)$$

$$4HCOOH \longrightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O \quad (6)$$

แบคทีเรียสร้างมีเทนจำแนกได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

1. Obligate Acetoclastic Methanogen สามารถบริโภคกรดอะเซติกได้เพียงอย่างเดียว โดยใช้เป็นแหล่งพลังงาน

$$CH_3COOH + H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2CO_3 \quad (7)$$

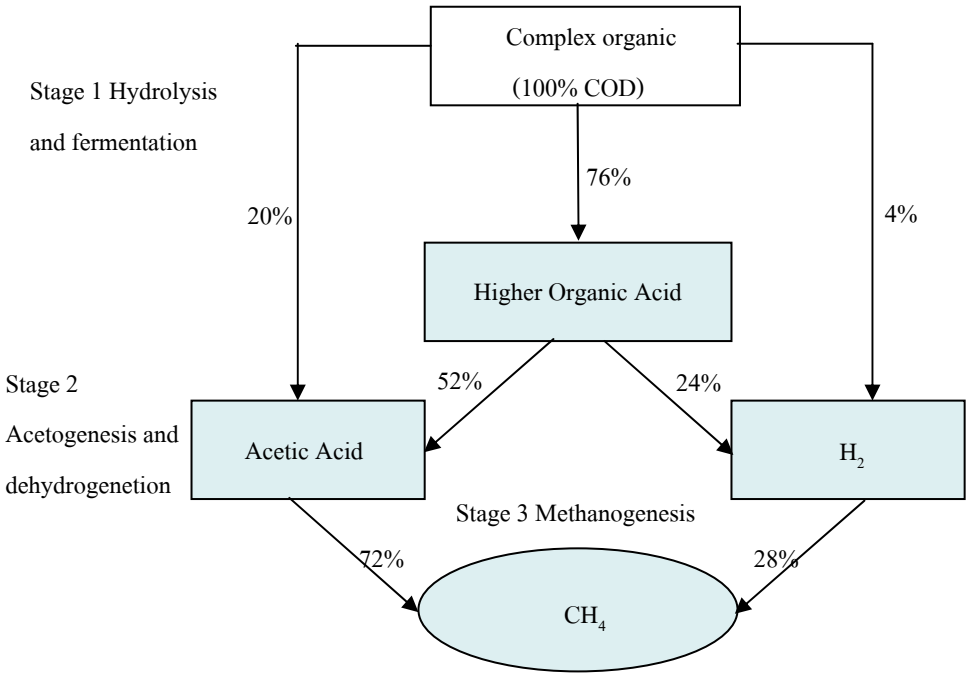
2. Hydrogenotrophic Methanogen (H_2 Utilizer) เป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตมีเทนได้จากไฮโดรเจนได้เพียงอย่างเดียว ในกรณีนี้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานและมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน

$$4H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O \quad (8)$$

3. Hydrogenotrophic/ Acetoclastic Methanogen เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างมีเทนได้จากกรดอะเซติกหรือไฮโดรเจน แต่จะชอบไฮโดรเจนมากกว่า

McCarty(1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของซีโอดีที่ถูกกำจัดไว้ดังนี้ 1 ปอนด์ของซีโอดีหรือบีโอดี ที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 5.62 ลบ.ฟุต ที่ STP หรือ 1 กรัมของซีโอดีที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 ลิตร ที่ STP (STP คือ Standard Temperature Presure, 25 องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ)

Jeris and Carty(1965) ได้ใช้ธาตุกัมมันตรังสี C_{14} ทดสอบการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ปรากฏว่าประมาณร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายของกรดอะซิติก ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนแบบไร้ออกซิเจน
ที่มา: มั่นสิน (2542)

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตในช่วงพีเอชแคบๆ เท่านั้น และปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมจะมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนทุกชนิด เป็นจุลินทรีย์ที่ดำรงชีวิตอยู่ได้เฉพาะในสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาดเท่านั้น

4. ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 60 – 70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30 – 40 มีก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แอมโมเนีย (NH_3) และมีความชื้นปนอยู่เล็กน้อย คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ ส่วนใหญ่ถูกกำหนดด้วยสัดส่วนของก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ60 จะให้ค่าพลังงานความร้อนประมาณ 4,500 – 5,000 กิโลแคลลอรี่/ ลบ.ม. ซึ่งคุณสมบัติของก๊าซมีเทนแสดงในตารางที่ 2

Smith and Mah (1978) พบว่ามีก๊าซมีเทนเพียงจำนวนเล็กน้อยถูกผลิตจากเมทานอลและกรดฟอร์มิค

Suphwat (1979) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์แบบไร้อากาศในปฏิกิริยาการหมักอุจจาระ น้ำจากผักตบชวา และฟางข้าวผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:1:2 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งควบคุมอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ในถังปริมาตร 15 ลิตรหลังจากนั้น 5 เดือน จะเกิดก๊าซชีวภาพ 300 ลิตรต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นก๊าซมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 62.5 ของก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของก๊าซมีเทน

ลักษณะสมบัติ	รายละเอียด
Chemical formula	CH_4
Molecular weight	16.042
Boiling point at 14.696 psi (760 mm Hg)	-258.68 ° F (-161.49 ° C)
Freezing point at 14.696 psi (760 mm Hg)	-296.46 ° F (-182.48 ° C)
Critical pressure	673.1 psi (47.363 ksc)
Critical temperature	-116.5 ° F (-82.5 ° C)
Specific gravity :	
Liquid (at – 263.2 ° F(-164 ° C))	0.415
Gas at 77 ° F (25 ° C) and 14.969 psi (760 mm Hg)	0.000658
Specific volume at 60 ° F (15.5 ° C) and 14.696 psi (760 mm Hg)	223.61 ft/lb (1.471/gm)
Calorific volume at 60 ° F (15.5 ° C) and 14.696 psi (760 mm Hg)	1,012 Btu/ft (38,130.71 KJ/m)
Air require for combustion ft^3/ft^3	9.53
Flammability limits	5 to 10 percent by volume
Octane rating	130
Ignition temperature	1,202 ° F (650 ° C)
Combustion equation	$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$

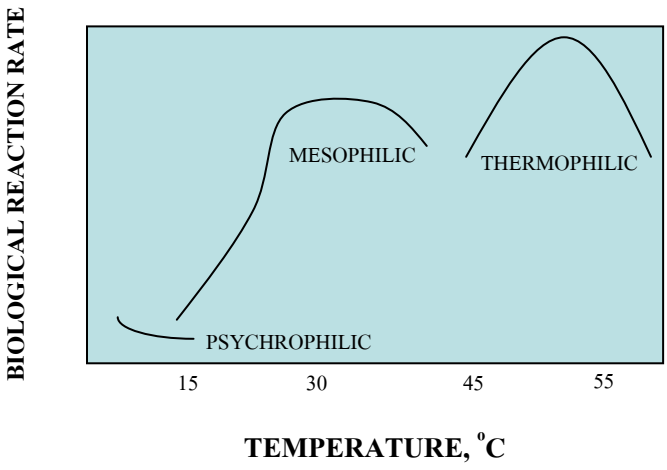
ที่มา: อภิสิทธิ์ (2533)

5. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ,ค่า pH, ปริมาณกรดอินทรีย์, Alkalinity, ธาตุอาหารเสริมสร้าง, สารพิษ, วิธีการเติมน้ำเสียเข้าระบบและการกวนผสม ดังนั้นในการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องเข้าใจองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องต่างๆ เหล่านี้

5.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อแบคทีเรียเป็นอันมากในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 5 ปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ช่วงอุณหภูมิ 2 ช่วงคือ ช่วง Mesophilic ระหว่างอุณหภูมิ 35 – 37 องศาเซลเซียสและช่วง Thermophilic ระหว่างอุณหภูมิ 50 – 55 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการควบคุมอุณหภูมิในถังหมักมักนิยมในช่วง Mesophilic มากกว่าอีก 2 ช่วงอุณหภูมิ เนื่องจากช่วง Mesophilic มีอัตราย่อยสลายสูงกว่าช่วง Psychrophilic มาก และไม่ต้องใช้พลังงานสูงมากในการควบคุมเหมือนช่วงอุณหภูมิ Thermophilic

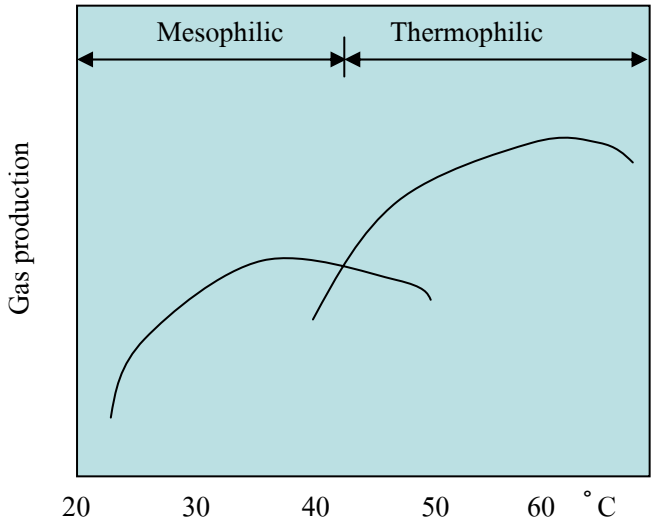


ภาพที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ (Anaerobic Digestion)

Speece and Ken (1970) ศึกษาผลการเปลี่ยนอุณหภูมิช่วงสั้นๆ ต่อการเกิดก๊าซมีเทน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าไม่มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C แต่ทันทีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงมากกว่า 20 °C การเกิดก๊าซมีเทนและอัตราส่วนการลดลงของค่าสารอินทรีย์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 20-45°C

Speece and Ken (1970) กล่าวว่า ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จะทำให้ระบบล้มเหลว และถ้าภาระบรรทุกของระบบสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันที

Gray (1989) รายงานว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ ช่วง 30-32 °C ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าช่วงดังกล่าว แบคทีเรียจะทำงานได้ไม่ดี ทำให้ประสิทธิภาพระบบลดลง แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อการผลิตก๊าซมีเทน
ที่มา: Gray (1989)

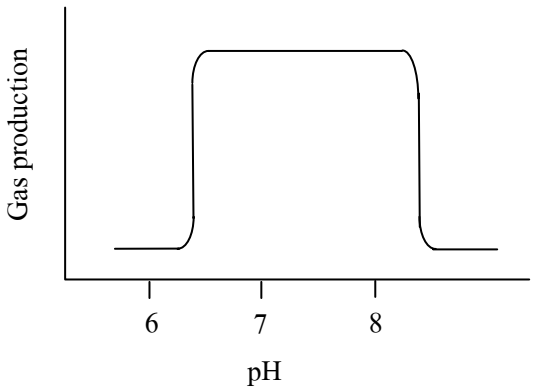
Metcalf and Eddy (1991) กล่าวว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดอยู่ในช่วง 85-100°F (30-38°C) และ 120-135°F (48-57°C)

5.2 ความเป็นกรดเป็นด่าง

ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มากโดยแบคทีเรียทั้งในภาวะมีและไม่มีออกซิเจนอิสระ แบคทีเรียเช่นเดียวกับสิ่งที่มีชีวิตอื่นๆ จะเจริญเติบโตไม่ดีในสภาพเป็นกรดและสภาพเป็นด่าง ช่วง pH เป็นกลางคือ 6.6 ถึง 7.8 เป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ถ้าค่า pH ในน้ำเสียในระบบหมักมีค่าต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม Methane formers ส่วนแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acid formers) มีความสามารถคงทนต่อสภาพเป็นกรดได้ต่ำถึง 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้ย่อยสลายอินทรีย์แล้วขับถ่ายของเสียเป็นพวกกรดอินทรีย์ ดังนั้นโดยธรรมชาติแล้วจึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้มีความคงทนต่อสภาพเป็นกรดได้ดีกว่าแบคทีเรียโดยทั่วไป ค่า pH ในถังหมักมีความสัมพันธ์กับค่า Alkalinity และความเข้มข้นกรดอินทรีย์ (Volatile fatly acids) ในถังหมักนั้น ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

McCarty (1964) กล่าวว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 6.6 – 7.6 และถ้าลดต่ำมากเกินไป ขั้นการเกิดมีเทนจะถูกยับยั้ง

Gray (1989) รายงานว่า ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำงานได้ดี เมื่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของระบบอยู่ในช่วง 6.6-7.8 ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ
ที่มา: Gray (1989)

5.3 Alkalinity

คือความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอน (Protons) ค่า Alkalinity วัดเป็น mg/l ในรูปของ $CaCO_3$ Alkalinity ในน้ำอยู่ในรูปของไบคาร์บอร์เนต, คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ค่า Alkalinity ในระบบหมักเป็นตัวเลขที่บ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบมีค่า Alkalinity สูง ย่อมแสดงว่าระบบหมักมี Buffering Capacity สูง แต่ในทางตรงข้ามถ้าระบบมีค่า Alkalinity ต่ำ ก็จะแสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในปริมาณค่อนข้างสูงในระบบแล้ว จำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมัก เพราะมีความโน้มเอียงที่จะเป็นกรดได้ง่าย ค่า Alkalinity ที่เหมาะสมต่อระบบหมักนี้ประมาณ 1,000-3,000 mg/l ถ้าค่า Alkalinity สูงกว่านี้ก็จะก่ออันตรายต่อแบคทีเรียได้ ในระบบหมักที่ทำงานสมบูรณ์ค่า Alkalinity เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารแอมโมเนียไบคาร์โบเนต (Ammonium bicarbonate) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายสารโปรตีนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แบคทีเรียขับออกมาดังสมการข้างล่าง

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow NH_4HCO_3 \qquad (9)$$

McCarty (1964) รายงานว่า ควรออกแบบไว้ให้มีค่า Alkalinity สูงๆ เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้เกิดความปลอดภัยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ Volatile acid อย่างกระทันหัน โดยค่า Alkalinity ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 2,500-5,000 mg/l as $CaCO_3$

Pretorius (1994) กล่าวว่า คาร์บอเนตและกรดไขมันโมเลกุลสั้น ต้านการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง และเนื่องจากความต้องการค่าความเป็นด่างในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีค่าสูง ดังนั้นการควบคุมกรด-ด่างจึงเป็นสิ่งจำเป็นมาก วิธีการการปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบเป็นวิธีที่ง่ายและให้ประสิทธิผลดี ทำให้ช่วงเวลาเริ่มต้นของระบบสั้นลง

Metcalf and Eddy (1991) กล่าวว่า พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.6-7.6 ซึ่งจะต้องมีความเป็นด่างที่เพียงพอที่จะไม่ทำให้พีเอชลดลงต่ำกว่า 6.2 เพราะว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถทำงานได้ดีที่พีเอชต่ำๆเมื่อระบบมีการย่อยสลายเป็นปกติแล้วค่าความเป็นด่างจะอยู่ในช่วง 1000-5000 มิลลิกรัมต่อลิตรและกรดไขมันระเหยจะต้องน้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.4 กรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acids)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจนอิสระนั้น มีแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ซึ่งอาจอาศัยอยู่ร่วมกันหรือแยกกันก็ได้ โดยกลุ่มแรกจะย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วปล่อยกรดอินทรีย์ (VFA) เป็นของเสียแล้วแบคทีเรียกลุ่มที่สองจะใช้กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารโดยให้แก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นจะเห็นว่าในขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้จะมีกรดอินทรีย์เป็น Intermediate products กรดอินทรีย์นี้อาจสะสมได้ในกรณีที่ระบบไม่อยู่ในสมดุลย์ คือการสร้างกรดอินทรีย์มากกว่าการใช้กรดอินทรีย์ ถ้ามีการสะสมกรดอินทรีย์เกิดขึ้นในระบบในช่วงแรกจะลดค่า Alkalinity ก่อน จนกระทั่งหมดแล้วถ้ายังมีการสะสมกรดอยู่อีกในที่สุด ค่า pH จะลดลง ถ้าค่า pH 6.5 ก็จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียพวกสร้างมีเทน ในกรณีที่มีการสะสมกรดอินทรีย์สูงมากจนค่า pH ต่ำกว่า 6.5 ถ้าไม่ทำการแก้ไข ในที่สุดค่า pH จะลดลงถึง 4.5-5.0 ซึ่งจะทำให้ระบบหมักเกิดสภาพเสียสมดุลย์ระหว่าง Acidogenesis กับ Methanogenesis ซึ่งสามารถสังเกตง่ายๆ จากมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวรุนแรง และเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนต่ำมาก (ปกติในสภาพหมักที่สมบูรณ์ควรมีเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนประมาณ 70)

กรดอินทรีย์ที่ตรวจพบในระบบหมักส่วนใหญ่ได้แก่ Acetic acid, Butyric acid และ Propionic acid โดยส่วนใหญ่จะเป็น Acetic acid ในสภาพ pH เป็นกลาง กรดเหล่านี้จะอยู่ในรูป Acetate, Butyrate และ Propionate ดังนั้นความเป็นพิษต่อ Methane former จะต่ำกว่าอยู่ในรูป Free acid form การวัดปริมาณกรดอินทรีย์ (VFA) จึงวัดในรูป mg/l ของ acetic acid หรือในรูป meq/l โดยที่ 60 mg/l acetic acid เท่ากับ 1 meq/l โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ในถังหมักไม่ควรเกิน 2,000 มก./ล. แต่อาจสูงได้ถึง 5,000 มก./ล. ในรูปกรดน้ำส้ม

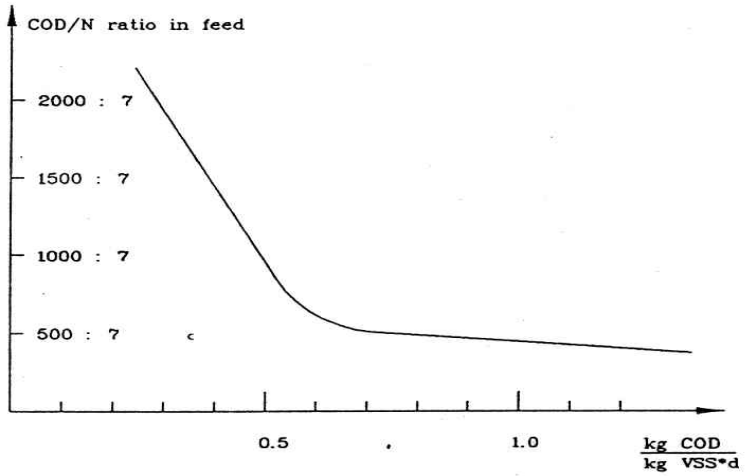
5.5 ธาตุอาหารเสริมสร้าง (Nutrients)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจนอิสระโดยแบคทีเรียนั้น ธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมากได้แก่ ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) อัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมักควรมีอัตราส่วน COD : N : P = 100 : 2.2 : 0.4 หรือ BOD : N : P = 100 : 1.1 : 0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตแก๊สชีวภาพจะต่ำลง แต่ตรงกันข้ามถ้ามีธาตุไนโตรเจนมาก

เกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย หรือเปลี่ยนสภาพแบคทีเรียได้ เช่น ตะกอนแบคทีเรียลอยตัวหลุดออกจากระบบได้ นอกจากธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ธาตุอื่นๆ ที่มีความจำเป็นต่อขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้แก่ Ca, Mg, Mo, Co และ Fe แต่แบคทีเรียต้องการในปริมาณน้อยมาก ดังนั้นธาตุเหล่านี้โดยทั่วไปจึงมีเพียงพอในน้ำเสียอยู่แล้ว ในทางปฏิบัติจึงคำนึงถึงปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเท่านั้น ถ้าตรวจวิเคราะห์ว่ามีไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเติมสารสองตัวดังกล่าวให้เพียงพอ

McCarty (1964) รายงานว่า ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solid) จะถูกผลิตขึ้นระหว่างการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยสามารถผลิตไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ประมาณ 10.5% และ 1.5% ตามลำดับ ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จะสามารถคำนวณความเข้มข้นของสารอาหารที่จำเป็นในการเติบโตได้ ปกติอัตราส่วนของ COD/N/P จะใช้อธิบายความต้องการสารอาหารได้ โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Observed yield) จะได้ดังภาพที่ 8

Benjamin (1981); Martensson and Frostell (1982); Van den Berg (1982) ได้อธิบายกราฟว่าอัตราส่วน COD/N ที่น้อยที่สุดคือ 350/7 ค่า 400/7 ใช้สำหรับระบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีภาระบรรทุกสูงๆ(0.8-1.2 KgCOD/Kg vss.d) ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ตรงกันกับของ Van den Berg (1977) ที่พบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบที่รับภาระสูงๆ คือ 420/7



ภาพที่ 8 แสดงอัตราส่วนของ COD/N ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
ที่มา: Henze and Harremoes (1983)

Metcalf and Eddy (1991) กล่าวว่า อาหารเสริมสร้างควรมีปริมาณเพียงพอ เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ต้องมีปริมาณเหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรีย

5.6 สารพิษ (Toxic Substances)

สารอนินทรีย์เกือบทุกสารถ้ามีปริมาณมากเกินไปในระบบหมักก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยทั่วไปพวกที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะส่งผลพิษรุนแรงกว่าพวกที่มีน้ำหนักอะตอมเบากว่า อิออนที่มี valency สูงจะส่งผลพิษรุนแรงกว่าพวกอิออนที่มี valency ต่ำกว่า

ตารางที่ 3 ระดับความเข้มข้นสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนอิสระ

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย mg/l
Cu	1.0
Zn_{6+}	5.0
Cr_{3+}	5.0
Cr	2,000
Total Chromium	5.0
Ni	2.0
Cd	0.02
S^-	100
SO_4^{2-}	500
Ammonia	1,500
Na^+	3,500
K^+	2,500
Ca^{2+}	2,500
Mg^{2+}	1,000
Aerylonitrite	5.0
Benzene	50

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย mg/l
CCl_4	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1.0

ที่มา: อภิสิทธิ์ (2533)

นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพวก benzene ring ซึ่งแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายถ้ามีมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียอีกด้วย แต่ปรากฏว่าน้ำเสียดังกล่าวยังสามารถถูกย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) โดยไม่แสดงความเป็นพิษให้เห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากในขวนหมักแบบใช้ออกซิเจนอิสระนี้ มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย เช่น การตกตะกอนของสารพิษ (Precipitation) การถูกทำลายเปลี่ยนไปเป็นสารรูปอื่น และการรวมตัวของไอออนต่างๆ จึงเกิดสภาพลดหรือเสริมความเป็นพิษ (Antagonism and Synergism) นอกจากนี้ยังขึ้นกับค่า pH ในระบบหมักอีกด้วย

Henze and Harremoes (1983) พบว่า Sulfite และ sulphate ซึ่งปกติไม่เป็นพิษ แต่เมื่ออยู่ในระบบไร้ออกซิเจน จะเปลี่ยนเป็น sulphide ซึ่งเป็นพิษและถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5 จะเพิ่มความเป็นพิษมากขึ้น เหล็กเป็นตัวลดพิษโดยการตกตะกอนเป็น ferrous sulphide

5.7 การเติม (Feeding Mode)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักอาจแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ

1. เติมครั้งเดียว (Batch Feed)
2. เติมกึ่งต่อเนื่อง (Semi- Continuous Feed)
3. เติมต่อเนื่อง (Continuous Feed)

การเติมน้ำเสียเข้าระบบหมักแบบต่อเนื่องตลอดเวลา จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเพราะสภาวะภายในถังหมักจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนวิธีแรกซึ่งเป็นการเติมน้ำเสียครั้งเดียว ระบบหมักจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากสภาพต่างๆ เช่น ความเข้มข้นสารอินทรีย์ เป็นต้น จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงทำให้แบคทีเรียต้องปรับตัวตลอดเวลา ดังนั้นในทางปฏิบัติมักเลือกวิธีเติมแบบต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีเป็นช่วงๆ ก็จำเป็นต้องใช้วิธีเติมแบบกึ่งต่อเนื่องแทน

5.8 การกวนผสม (Mixing)

การกวนผสมน้ำในระบบหมักมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบมาก เพราะจะช่วยทำให้แบคทีเรียมีโอกาสพบสารอาหารได้ทั่วถึง นอกจากนี้จึงเป็นการช่วยทำให้สภาพต่างๆ เช่น อุณหภูมิ สารอินทรีย์ ตลอดจนสารพิษกระจายทั่วกันทั้งระบบอีกด้วย การกวนผสมอาจทำได้โดยใช้เครื่องกวนใช้เครื่องดูดแก๊สชีวภาพกลับเข้าไปในถังหมักเพื่อกวนผสม และ/หรือ สูบน้ำหมุนเวียนให้สูงขึ้นในถังหมัก

6. รูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

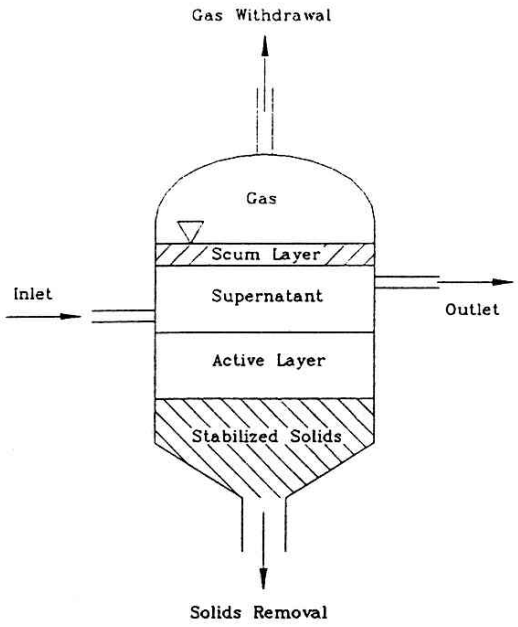
6.1 ถังหมักไร้อากาศแบบธรรมดา (Conventional Anaerobic Digestion)

เป็นถังหมักไร้อากาศระบบที่ใช้กันแพร่หลาย ในการย่อยสลายตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ระบบกำจัดประกอบด้วย ถังปฏิกิริยาซึ่งส่วนใหญ่เป็นคอนกรีตมีฝาปิดเพื่อเก็บความร้อน กลิ่น ก๊าซ มีท่อระบายก๊าซบนฝาถังเพื่อระบายก๊าซออกจากระบบ ถังหมักแบบธรรมดามี 2 แบบคือ

6.1.1 ถังหมักไร้อากาศชนิดอัตรากำจัดต่ำ (Low Rate Anaerobic Digestion) ภายในถังไม่มีเครื่องกวน ทำให้ตะกอนหนักจมลงก้นถัง ตะกอนเบาลอยอยู่ชั้นบน ชั้นตะกอนเบาจะหนาหลายฟุตซึ่งเป็นการลดปริมาตรถังย่อย และทำให้เกิดการลัดวงจร (short circuit) ได้ง่ายอีกด้วย ของเหลวและตะกอนในถังจะแยกออกเป็นส่วนๆ ได้แก่ (1) Scum layer เป็นชั้นของตะกอนที่ลอยตัว เนื่องจากมีรูพรุนหรือมีฟองก๊าซเกาะอยู่ (2) Supernatant เป็นชั้นของน้ำที่ตะกอนแยกตัวออก (3) Active layer เป็นชั้นที่มีการย่อยสลายตะกอน แบคทีเรียส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตในชั้นนี้ และ (4) Stabilized solids เป็นตะกอนที่ย่อยสลายแล้ว และตกลงสู่ก้นถังส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจาก

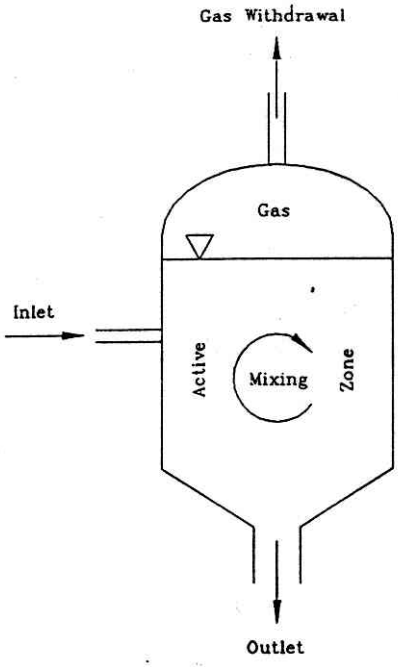
กระบวนการย่อยสลายซึ่งส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์จะลอยสู่ส่วนบนของถัง ซึ่งจะช่วยขยาย active layer ทำให้การย่อยสลายตะกอนเป็นไปอย่างรวดเร็ว แสดงดังภาพที่ 9

6.1.2 ถังหมักไร้อากาศชนิดอัตรากำจัดสูง (High Rate Anaerobic Digestion) ภายในถังมีเครื่องกวนเพื่อให้เกิดการผสมอย่างทั่วถึง (Completely Mixed) ดังแสดงในภาพที่ 10 ในถังแบบนี้มีการลัดวงจรน้อยลง ทำให้ระยะเวลากักเก็บน้ำทิ้งที่จำเป็นน้อยลง และประสิทธิภาพดี เนื่องจากจุลชีพสัมผัสกับของเสียได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น แต่น้ำเสียที่ออกจากถังหมักชนิดนี้จะมีปริมาณตะกอนจุลชีพหลุดออกไปด้วย จึงมีการพัฒนาให้มีการแยกตะกอนก่อนปล่อยทิ้งดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของแข็งได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยของแข็งจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซชีวภาพและเนื่องจากจุลชีพไร้อากาศมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำมาก ระบบจึงควรมีระยะเวลากักเก็บน้ำนานประมาณ 10-30 วัน



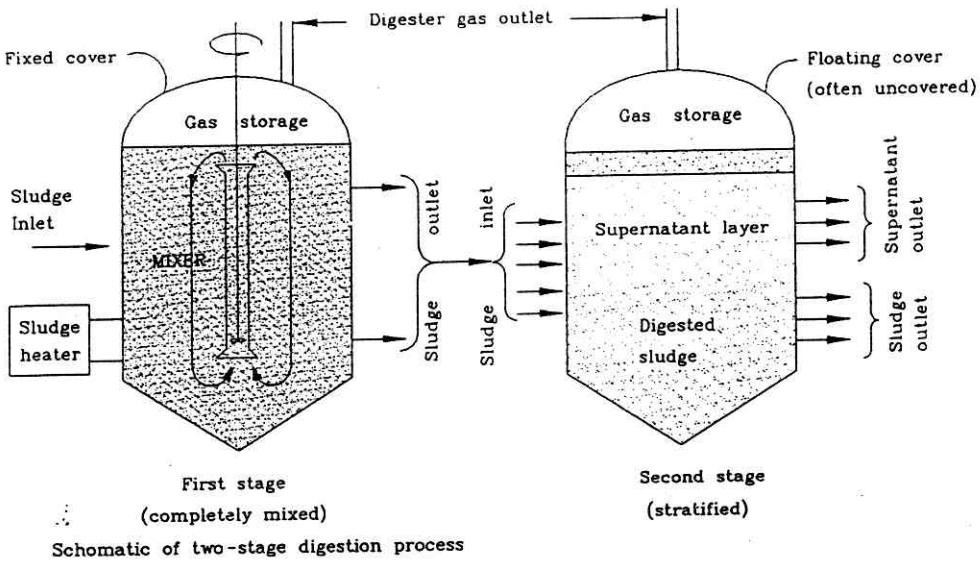
ภาพที่ 9 ถังหมักไร้อากาศแบบอัตรากำจัดต่ำ

ที่มา: Reynold and Richards (1996)



ภาพที่ 10 ถังหมักไร้อากาศแบบอัตรากำจัดสูง

ที่มา: Reynold and Richards (1996)

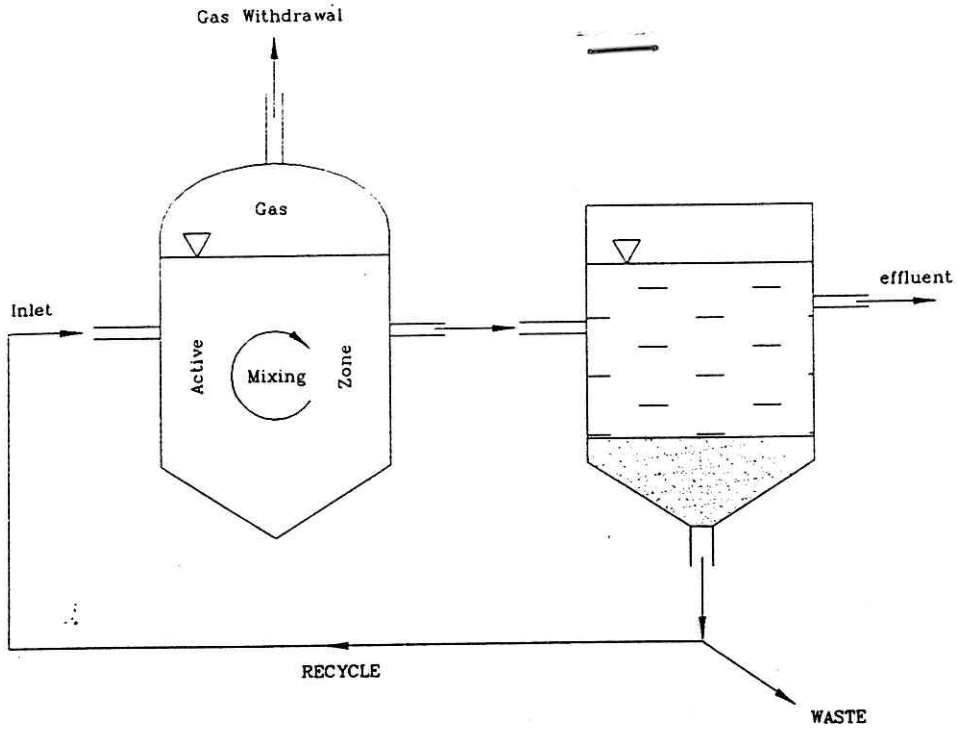


ภาพที่ 11 ถังหมักไร้อากาศแบบอัตรากำจัดสูงที่มีการแยกตะกอน

ที่มา: Reynold and Richards (1996)

6.2 ถังหมักไร้อากาศแบบสัมผัส (Anaerobic Contact)

เป็นถังหมักที่ดัดแปลงมาจากถังหมักชนิดอัตรากำจัดสูง ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นของแข็ง หรือสารละลายก็ได้ ในบางครั้งอาจเป็นถังปฏิกิริยาแบบมีการหมุนเวียนตะกอนหรือไม่มีก็ได้ แต่นิยมใช้แบบมีการหมุนเวียนตะกอน ดังนั้นถังหมักแบบสัมผัสนี้จึงมีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกับระบบแอ็คติเว้ตเต็ดสลัดจ์แบบใช้อากาศ เพียงแต่ไม่มีการเติมอากาศ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ถังหมักไร้อากาศแบบสัมผัส (Anaerobic Contact)
ที่มา: Reynold and Richards (1996)

ซึ่งช่วยลดปัญหาการสิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศให้แก่เชื้อแบคทีเรียได้ วิธีการและหลักการในการบำบัดน้ำเสียเหมือนกับกระบวนการแบบไร้ออกซิเจนทั่วไป เพียงแต่ในถังปฏิกิริยามีการกวนผสมอย่างทั่วถึงและมีถังตกตะกอนภายนอกเพื่อแยกตะกอนแบคทีเรียออกจากน้ำแล้วหมุนเวียนเข้าถังปฏิกิริยาเพื่อรักษาปริมาณของตะกอนแบคทีเรียและเพิ่มอายุของตะกอนรวมทั้งยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพนำกลับมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้อีกด้วย ดังนั้นจึงนำกระบวนการนี้มาศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย ในปี 1950 Stander ได้

พบความสำคัญของการเลี้ยงแบคทีเรียให้อยู่ในถังเป็นจำนวนมากๆ ทำโดยการแยกตะกอนออกจากน้ำทิ้ง แล้วนำกลับมาใส่ในถังปฏิกิริยาทำให้สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดลงได้ เรียกระบบนี้ว่า Schroepfer และผู้ร่วมงานได้ปรับปรุงระบบนี้เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมและเพิ่มเสถียรภาพโดยการติดตั้งถังตกตะกอนภายนอก เพื่อใช้แยกจุลินทรีย์จากน้ำทิ้งแทนที่จะให้อยู่ในถังเดียวกัน แล้วจึงนำตะกอนที่แยกได้กลับเข้าสู่ถังใหม่ ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีมากขึ้น เป็นเหตุให้สามารถลดระยะเวลากักเก็บน้ำ และขนาดถังปฏิกิริยาลงได้มาก เรียกระบบแบบนี้ว่า ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค(Anaerobic Contact)

ระบบแอนแอโรบิคมีจุดเด่นคือ ใช้พลังงานน้อยและสร้างตะกอนจุลินทรีย์น้อยด้วยแต่มีข้อเสียคือไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมากๆได้ ทำให้จะต้องใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆด้วยเสมอ น้ำเสียหรือของเสียที่เหมาะกับการใช้กระบวนการใช้กระบวนการนี้ในการบำบัดคือ ตะกอนอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10,000-20,000 มก./ล.หรือน้ำเสียที่มีซีโอดีอยู่ในช่วง 1,000-10,000 มก./ล.การแยกตะกอนจากน้ำออกจำเป็นต้องมีถังตกตะกอนภายนอกถังปฏิกิริยา ความคงที่ของความเข้มข้นตะกอนหมุนเวียนและอัตราการหมุนเวียนตะกอน มีผลต่อความสามารถในการทำงานของระบบ

ค่าเวลากักเก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับ ระบบแอนแอโรบิคคอนแทคอยู่ในช่วง 1-10 วัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย ถ้าบำบัดตะกอนอินทรีย์จะใช้เวลากักเก็บนานกว่าบำบัดสารละลายอินทรีย์ แต่ในทุกกรณีขนาดของถังจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักแบบธรรมดาค่าบรรทุกสารอินทรีย์ที่ได้ผลดีที่สุดสำหรับ ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค คือ 2-10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงกว่านี้สามารถใช้ได้โดยระบบไม่มีปัญหา แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดจะต่ำลง ขนาดถังปฏิกิริยาที่มีปริมาตรลดลงเมื่อเทียบกับถังหมักแบบธรรมดา ทำให้ประหยัดค่าลงทุนในการทำโครงสร้างถังและมีการกวนผสมจะได้ประสิทธิภาพมากกว่า โดยใช้กำลังเครื่องจักรกลลดลงตามการลดลงของปริมาตร ตะกอนอาจจะถูกแยกและหมุนเวียนในอัตราเท่าใดก็ได้ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอัตราการเติมน้ำเข้าและอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ ทำให้การควบคุมอายุตะกอนได้ผลมากขึ้น

การตกตะกอนสำหรับ ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค ไม่สามารถตกตะกอนได้ดีเหมือนกับระบบเอเอส จึงมีการหลุดหนีของตะกอนเกิดขึ้นตลอดเวลาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้อาจจะเกิดปัญหาตะกอนลอย เพราะฟองก๊าซจับตัวกันกับตะกอนจุลินทรีย์ ดังนั้นการแยก

ตะกอนโดยการทำฟร้อคกูเลชันอาจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ถ้าใช้การตกตะกอนด้วยแรงดึงดูดของโลก จะต้องมีการยับยั้งการเกิดก๊าซชั่วคราว อาจจะเติมออกซิเจนเข้าไปในน้ำก่อนตกตะกอนหรือลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว 5-10 องศาเซลเซียส วิธีการเหล่านี้เป็นเพียงผลกระทบชั่วคราวไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาแบคทีเรียกลุ่มที่รับผิดชอบในการสร้างกรด มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชและอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังมีอัตราการเจริญเติบโตมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจึงเป็นตัวจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

O'Rourke (1968) ได้แสดงไว้ว่าปัจจัยที่จำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในระบบไร้ออกซิเจนที่สำคัญที่สุดคือ อัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนและการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 20 องศาเซลเซียสและ 35 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการทำงานในช่วง Mesophilic Anaerobic และ Lawrence (1971) ได้เสนอว่าทุกค่าของอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส ค่าKinetic ต่างๆในการสร้างมีเทนจะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับกระบวนการไร้ออกซิเจน โดยนัยแล้วสมการที่แสดงกลไกลต่างๆที่ใช้สำหรับอธิบายระบบตะกอนเร่งแบบกวนสมบูรณ์ที่มีการหมุนเวียนตะกอน สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแอนแอโรบิคคอนแทค ได้เช่นกัน

$$1/\theta_c = (Y_t k S_e / (K_s + S_e)) - K_d \quad (10)$$

$$S_e = (K_s (1 + K_d\theta_c)) / (\theta_c (Y_t k - K_d) - 1) \quad (11)$$

$$X = (\theta_c Y_t Q (S_0 - S_e)) / (V_a (1 + K_d\theta_c) \quad (12)$$

$$1/\theta_c = (Q / V_a)(1 + R - RX_r / X) \quad (13)$$

$$1/\theta_c^m = (Y_t k S_0 / (K_s + S_0)) - K_d \quad (14)$$

ค่าอายุตะกอนต่ำสุด ที่หาได้สำหรับกระบวนการแบบไร้ออกซิเจน จะมีค่ามากกว่ากระบวนการแบบใช้ออกซิเจนมากเพราะค่าYieldต่อหน่วยของอาหารที่ใช้ มีค่าต่ำกว่ากระบวนการแบบใช้ออกซิเจนมากเพราะค่าอายุตะกอนต่ำสุด มีค่าแปรผกผันกับค่า Yield ดังสมการ (14) สำหรับค่าที่ใช้ในการ

ออกแบบ โดยทั่วไป ค่าอายุตะกอนที่ใช้มีค่าประมาณ 2 ถึง 10 เท่า ของอายุตะกอนต่ำสุด เพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานของระบบจะไม่ล้มเหลว

McCarty (1968) ได้กล่าวไว้ว่า K_d มีค่าต่ำมากดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณา ในกรณีนี้ θ_c^m สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$\theta_c^m = (1 / Y_t k) ((K_s + S_0) / S_0) \quad (15)$$

Mc.Carty & Lawrence (1969) กล่าวไว้ว่า เมื่อ $S_0 >> K_s$ (เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกิริยา มีค่ามากพอที่จะไม่เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโต) ค่าอายุตะกอนต่ำสุด ที่ให้ความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดจำเพาะคือ

$$(\theta_c^m)_{limit} = 1/ \mu_{max} = 1/ (Y_t k) \quad (16)$$

ค่า $(\theta_c^m)_{limit}$ สำหรับการผลิตมีเทน เมื่อเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสารอาหารได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าอายุตะกอนต่ำสุดสำหรับการสร้างมีเทนเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดของอาหาร

Substrate	$(\theta_c^m)_{limit}$ (day)			
Energy substrate	35 °C	30 °C	25 °C	20 °C
Acetic acid	3.1	4.2	4.2	-
Propionic acid	3.2	-	2.8	-
Butyric acid	2.7	-	-	-
Long-chain fatty acid	4.0	-	5.8	7.2
Hydrogen	0.95[a]			
Sewage sludge	4.2[b]		7.5[b]	10[b]
Sewage sludge	2.6[c]			

หมายเหตุ : a = 37 °C

b = Computed values of θ_c^m for S_0 = 18.1 mg COD / L

c = Experimentally observed value

เมื่อให้ค่า Y_t K_d และ k เท่ากันสำหรับการย่อยสลายกรดอินทรีย์แต่ละชนิด O'Rourke (1968) เสนอว่าสมการที่ (11) สามารถประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

$$(S_e) \text{ Overall} = (K_c (1+ K_d\theta_c)) / (\theta_c (Y_t k - K_d) - 1 \quad (17)$$

เมื่อ K_c คือผลรวมของ K_s สำหรับกรดอินทรีย์ทุกๆตัวที่พบหรือเกิดขึ้นในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

เพื่อหาค่าผลกระทบของอุณหภูมิต่อผลผลิตมีเทน O'Rourke (1968) ได้ให้สมการไว้ดังนี้

$$(k)_t = (6.67 \text{ day}^{-1}) \ 10^{-0.015(35-t)} \quad (18)$$

$$(k_c)_t = (2{,}224 \text{ mg COD / L}) \ 10^{0.046(35 - t)} \quad (19)$$

สมการที่ (17) (18) และ (19)ใช้ได้กับของเสียที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วย ไขมัน ปริมาณสูง เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส และยอมรับได้สำหรับเพื่อการออกแบบใช้กับของเสียที่เป็น Low –Lipid Content Lawrence(1971) พบว่าช่วงและค่าเฉลี่ยของ Y_t และ K_d ที่หาได้สำหรับการผลิตมีเทนจากกรดอะเซติค กรดโพรไพโอนิค และกรดบิวทีริคแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเหตุนี้คำแนะนำสำหรับการออกแบบให้มีค่าคงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิดังนี้

Y_t = 0.044 และ K_d = 0.019 d^{-1} ใช้สำหรับ Low –Lipid Waste และใช้ค่า Y_t = 0.040 และ K_d = 0.015 d^{-1} สำหรับ High-LipidContent และ Complex Waste เช่นตะกอนอินทรีย์ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นต้น

ตารางที่ 5 ช่วงและค่าเฉลี่ยของ Y_tและ K_dในการผลิตมีเทนจากกรดอินทรีย์

Parameter	Range	Average
Y_t	0.040-0.054	0.044
K_d	0.010-0.040	0.019

ข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบระบบแอนแอร์โรบิคคอนแทค ค่าอายุตะกอน (θ_c) ที่เลือกออกแบบมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 เท่า ของอายุตะกอนต่ำสุด (θ_c^m) ที่อุณหภูมิต่ำลงที่อายุตะกอนต่ำสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการลดลงของอัตราจำเพาะสูงสุดของการใช้สารอาหาร (Maximum Specfic Rate of Substrate Utilzation , k) ด้วยเหตุนี้ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจึงใช้ไม่ได้ผลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส การดำเนินการของกระบวนการไร้ออกซิเจน อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 35 องศาเซลเซียส ปัจจัยอีกข้อที่ใช้ตัดสินใจในการเลือกระบบ คือ ปริมาณมีเทนที่ได้ต้องเพียงพอที่จะใช้ในระบบเพิ่มความร้อนโดยปราศจากการใช้พลังงานเสริมจากภายนอก Lawrence (1971) รายงานว่าซีโอดีของของเสียที่จะบำบัดควรมีประมาณ 5,000 มก./ล.หรือมากกว่า ถ้าจำเป็นต้องมีการปรับอุณหภูมิของของเสีย โดยไม่ต้องใช้พลังงานเสริม

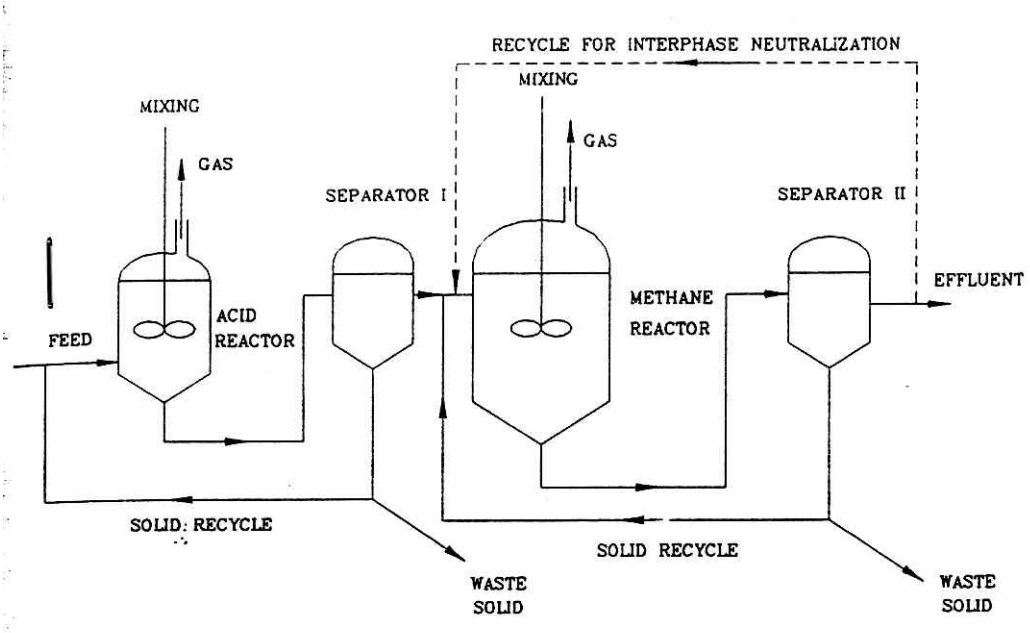
ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ค่าอายุตะกอน (θ_c) ที่ใช้ตามทฤษฎี ควรจะมีค่าสูงพอที่จะไม่เป็นตัวจำกัดอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ ที่ต้องการในกระบวนการทางชีวภาพ Lawrence (1971) กล่าวว่าสำหรับระบบแอนแอโรบิคคอนแทค ปัจจัยอื่นนอกเหนือจากค่าทางจลน์แต่มีความสำคัญ คือ

1. ธาตุอาหารที่จะนำมาใช้ได้
2. ความเป็นพิษ
3. การควบคุมพีเอช
4. ประสิทธิภาพของการแยกตะกอน
5. อัตราการหมุนเวียนตะกอน

เพื่อให้แน่ใจว่าการแยกตะกอนเกิดขึ้นได้ดีพอความเข้มข้นของตะกอนในถังปฏิกิริยามักจะควบคุมไว้ที่ประมาณ 8,000-15,000 มก./ล. อัตราการหมุนเวียนตะกอนที่ใช้สำหรับระบบแอนแอโรบิคคอนแทค มักจะอยู่ในช่วง 2:1 ถึง 4:1

6.3 ถังหมักไร้อากาศแบบสองเฟส (Two-Phase Anaerobic Digestion)

เป็นถังแยกถังหมักออกเป็นสองส่วนตามลักษณะการทำงานของจุลชีพแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อความสะดวกในการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกับจุลชีพแต่ละชนิดดังภาพที่ 13 ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนประกอบของถังหมักแบบสองเฟส ที่ใช้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นตัวกำหนดและควบคุมแบคทีเรียในถังหมัก ถังใบแรกมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6 จะมีแต่แบคทีเรียประเภทสร้างกรด ส่วนถังใบที่สองซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7 จะมีแบคทีเรียสร้างมีเทน การควบคุมความเป็นกรด-ด่างแบบอัตโนมัติเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับถังใบแรกเท่านั้น ก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นในถังใบแรกจะถูกปล่อยทิ้งออกไปเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมตัวจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างกรด วิศวกรบางคนอาจมีวิธีอื่นในการควบคุมแบคทีเรียในถังหมักโดยมิต้องใช้ความเป็นกรด-ด่าง เช่น โดยการควบคุมระดับ SRT (Sludge Retention Time)



ภาพที่ 13 ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองเฟส (Two-Phase Anaerobic Digestion)
ที่มา: Reynold and Richards (1996)

7. พารามิเตอร์ที่สำคัญ

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ พารามิเตอร์เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมและความต้องการของจุลินทรีย์เช่น พีเอช อุณหภูมิ สารอาหารและการกวนเป็นต้น ส่วนพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานได้แก่ปริมาณสารอินทรีย์ อัตราการไหล อัตราการสูบตะกอนกลับและอายุตะกอนเป็นต้น สำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมและความต้องการของจุลินทรีย์จะต้องรักษาระดับอยู่ในช่วงที่พอเหมาะและจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งต้องอาศัยความรู้ด้านจุลชีววิทยาและชีวเคมีขั้นพื้นฐาน ส่วนพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของกระบวนการแต่ละชนิดจำเป็นต้องทำการศึกษาเฉพาะในแต่ละกรณี เพราะเกี่ยวข้องทั้งลักษณะสมบัติของน้ำเสียและกลไกในการทำงานของจุลชีพภายในกระบวนการนั้น ๆ กระบวนการตะกอนเร่งแบบไร้ออกซิเจนมีพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานหลักๆอยู่ 4 ค่า คือ

7.1 ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading) ได้แก่ น้ำหนักของมลสารอินทรีย์ที่เข้าไปในถังปฏิกิริยา ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของถังปฏิกิริยา หรือเพื่อความถูกต้องในการควบคุมระบบเพิ่มขึ้น ควรเปลี่ยนค่าบรรทุกสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปอัตราส่วนของน้ำหนักสารอินทรีย์ต่อน้ำหนักของแบคทีเรีย (F/M ratio)

7.2 ภาระบรรทุกการไหลของน้ำ (Hydraulic Loading) ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังปฏิกิริยาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของถังปฏิกิริยา

7.3 อัตราการสูบตะกอนกลับ (Recycle ratio) คือ อัตราการสูบตะกอนจากก้นถังตกตะกอนกลับเข้าถังปฏิกิริยา เพื่อรักษาปริมาณตะกอนในถังปฏิกิริยาให้เหมาะสม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ โดยปกติจะมีค่าไม่เกิน 200 เปอร์เซ็นของน้ำเสียเข้าระบบ

7.4 อายุตะกอน (Sludge Age) คือ ระยะเวลาเก็บกักของตะกอนแบคเรียที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดมลสารอินทรีย์ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดและคัดเลือกสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานทั้ง 4 ค่า ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ค่าอายุตะกอน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์และอัตราสูบตะกอนกลับนับได้ว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญที่สุด ส่วนภาระบรรทุกการไหลของน้ำ จะมีผลต่อระยะเวลาในการบำบัดของจุลินทรีย์ ซึ่งถ้าหากไม่สั้นจนเกินไปจะมีผลต่อประสิทธิภาพน้อยกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ