



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำกากสำ

2.1.1. กระบวนการผลิตสุราจากกากน้ำตาล (สุจินต์ พนาปวุฒิกุล, 2528) แสดงดังภาพที่ 2.1 แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่

1. การหมักกากน้ำตาล (Fermentation)

กากน้ำตาล (molasses) เป็นผลิตภัณฑ์เหลือจากการผลิตของโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตกผลึกได้ต่อไปอีก มีสีน้ำตาลหรือน้ำตาลเข้ม มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อัตราความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมในการหมักประมาณร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการหมักจึงต้องเจือจางกากน้ำตาลด้วยน้ำ 3 เท่า แล้วจึงใส่เชื้อหมัก (yeast) และอาหารเสริม การหมักใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง จะได้แอลกอฮอล์ร้อยละ 8-10 โดยปริมาตร ส่วนผสมของแอลกอฮอล์ภายหลังการหมักนี้เรียกว่า เบียร์ (beer) หรือแมช (mash) หรือน้ำสำ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหมักกลั่น

2. การกลั่นแอลกอฮอล์ (Distillation)

น้ำสำถูกส่งมายังหมักกลั่นแรก เพื่อกลั่นแยกแอลกอฮอล์ออกมา ได้แอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 50 ส่วนหนึ่งของที่กลั่นได้นี้ถูกนำไปผลิตเป็นสุราขาว และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปกลั่นในขั้นต่อไป เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตร

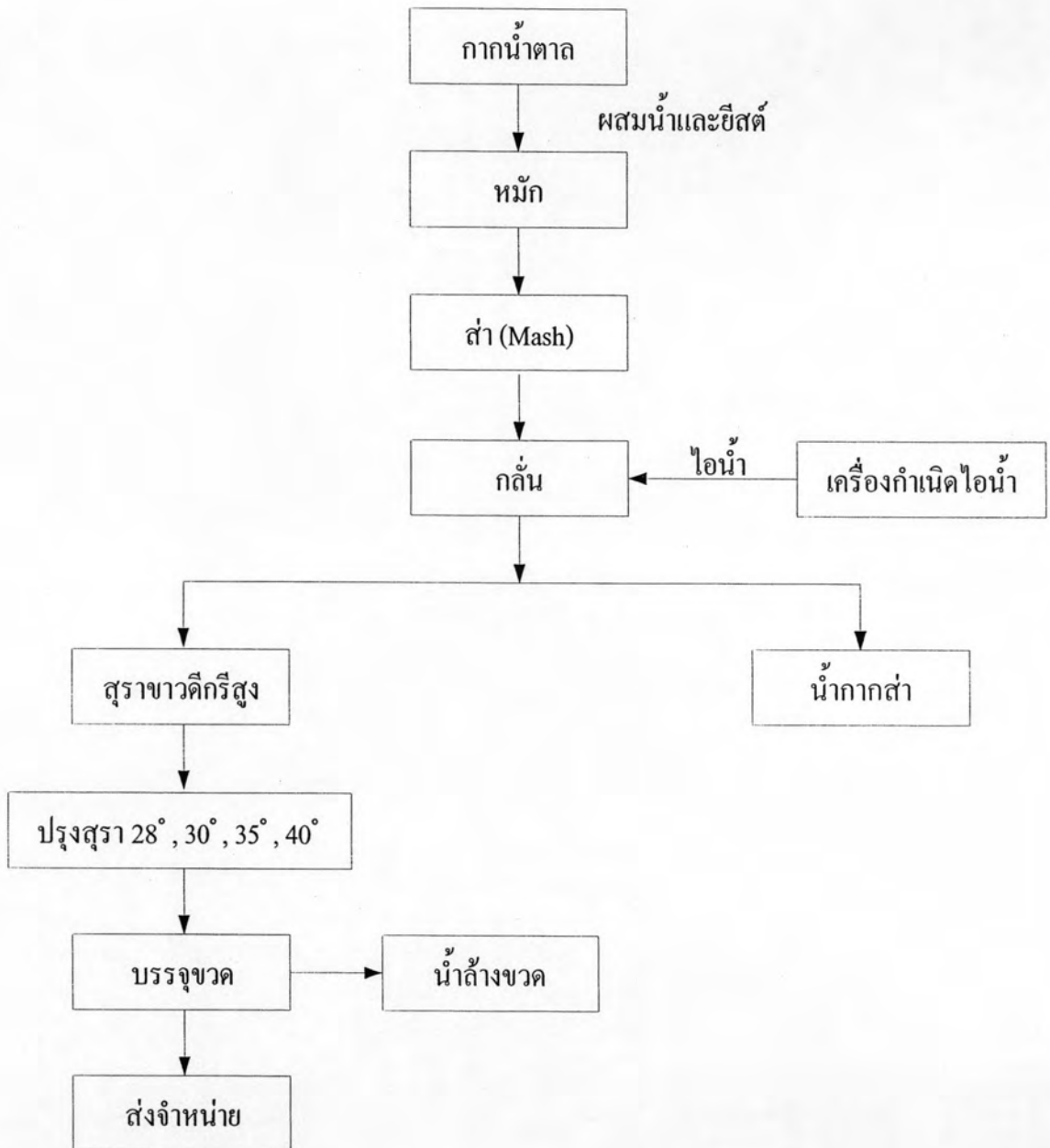
3. การผลิตสุราขาว (Raw Alcohol Production)

ส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์ ร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งแรก จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 28 โดยปริมาตร หรือ 28° (28 ดีกรี) เรียกว่า สุราขาว จากนั้นกรองเศษผงและสิ่งเจือปนออกปรงให้เหมาะสมและนำมาบ่มต่อประมาณ 7 วัน แล้วนำไปบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

4. การผลิตสุราผสม (Blended Liquor Production)

นำแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งที่สองมาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร หรือ 35° (35 ดีกรี) แล้วเติม

สีผสมอาหารและส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติตามความต้องการ จากนั้นนำมากรองและบ่มต่อประมาณ 7 วัน ก่อนบรรจุลงขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตสุราจากกากน้ำตาลของโรงงานสุรากลับ
 ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กองทุนสุรา, 2549

2.1.2. ประเภทน้ำเสียจากโรงงานสุรา

น้ำเสียจากโรงงานสุรา แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. **น้ำเสียประเภทเข้มข้น** เป็นน้ำเสียมีค่าบีโอดีสูงประมาณ 2,500–35,000 มก./ล. ได้แก่ น้ำล้างถังหมัก และน้ำกากส่า ปริมาณน้ำเสียขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตของแต่ละโรงงาน เนื่องจากน้ำล้างถังหมักมีปริมาณน้อยประมาณ 5–10 ลบ.ม./วัน (กรมสรรพสามิต, 2526) น้ำเสียทั้งสองจึงนำมาบำบัดรวมกัน แม้ว่าค่าบีโอดีจะแตกต่างกันประมาณ 14 เท่า (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ และ มาลี วิศวจารย์, 2529)

2. **น้ำเสียประเภทเจือจาง** เป็นน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีต่ำ ประมาณ 10–450 มก./ล. (กรมสรรพสามิต, 2526) ได้แก่ น้ำล้างขวด น้ำหล่อเย็น และน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือน เป็นต้น น้ำเสียประเภทนี้ไม่นำมาบำบัดรวมกับน้ำกากส่า เนื่องจากมีค่าบีโอดีแตกต่างกันมากและมีปริมาณสูง การแยกบำบัดจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.1.3. ลักษณะของน้ำเสียของโรงงานสุรากลั่น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กองทุนสุรา, 2549)

ลักษณะของน้ำเสียดิบและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของโรงงานสุรากลั่น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. น้ำเสียดิบ

• น้ำเสียกากส่า

น้ำเสียกากส่าเป็นน้ำเสียหลักจากกระบวนการผลิตสุรากลั่น โดยมีปริมาณมากถึงร้อยละ 44.8–99.3 ของน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด น้ำเสียมีสีดำเข้ม อุณหภูมิสูงเนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ระบายทิ้งจากหมักโดยมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 46–100°C น้ำเสียกากส่ามีความสกปรกสูงมาก พบว่ามีค่าบีโอดีและซีโอดีอยู่ระหว่าง 32,000–75,000 และ 124,630–182,200 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนบีโอดี/ซีโอดีพบว่า มีค่าเท่ากับ 0.26–0.51 แสดงว่าน้ำเสียมีความสามารถในการสลายทางชีวภาพค่อนข้างต่ำ ค่าพีเอชของน้ำเสียค่อนข้างเป็นกรดอยู่ระหว่าง 3.75–4.95 นอกจากนี้ น้ำเสียยังมีลักษณะขุ่นข้น โดยพบว่ามีค่าของของแข็งแขวนลอยอยู่ระหว่าง 20,120–63,750 มก./ล. ดังแสดงดังตารางที่ 2.1

- **น้ำล้างถังหมัก**

น้ำล้างถังหมัก เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการล้างถังหมักสา ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่จะระบายน้ำล้างถังหมักสาพร้อมกับน้ำเสียจากสา ส่วนบางโรงงานจะส่งน้ำล้างถังหมักสาเข้ากลิ่นในหอกลั่นร่วมกับน้ำสาด้วย น้ำล้างถังหมักมีปริมาณไม่มากมีเพียงร้อยละ 0.5–3.5 ของน้ำเสียทั้งหมด พบว่าน้ำล้างถังหมักมีค่าความสกปรกแตกต่างกันขึ้นกับการเดินระบบและการจัดการผลิตดังกล่าวข้างต้น โดยมีค่าบีโอดี ซีโอดีและของแข็งแขวนลอยอยู่ระหว่าง 420–97,500, 930– 72,800 และ 49 –127,300 มก./ล. ตามลำดับ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55,944, 132,668 และ 59,072 มก./ล. ตามลำดับ) น้ำเสียนี้อาจใช้เพื่อเป็นกรด

- **น้ำล้างขวด**

โรงงานส่วนใหญ่จะนำขวดเก่าที่รับซื้อมาได้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดและน้ำร้อน โดยใช้เครื่องล้างอัตโนมัติ ดังนั้นน้ำเสียจากการล้างขวดจึงมีความสกปรกที่เกิดจากน้ำยาล้างทำความสะอาด เศษฉลาก และสิ่งสกปรกที่ค้างอยู่ในขวด พบว่าน้ำเสียนี้อาจใช้เพื่อเป็นด่าง (10–13.75) บีโอดี ซีโอดีและของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่าง 1–83, 14–360 และ 0.3–130 มก./ล. ตามลำดับ (เฉลี่ยเท่ากับ 32.75, 151 และ 30.97 มก./ล. ตามลำดับ) น้ำล้างขวดจากโรงงานสุรากลั่นมีปริมาณร้อยละ 10.6–51.7 ของน้ำเสียทั้งหมด น้ำล้างขวดถูกนำไปบำบัดรวมกับน้ำเสียจากห้องน้ำห้องส้วม โดยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนก่อนที่จะระบายออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป

2. น้ำหลังบำบัด

- **น้ำเสียในบ่อบำบัดสุดท้าย**

น้ำกากสาหลังจากถูกบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนแล้วพบว่ายังคงมีสีค้ำเข้ม มีค่าพีเอชเป็นกลางถึงด่าง (7.62–9.8) ค่าบีโอดีในน้ำเสียนี้นี้มีความแปรปรวนมากตั้งแต่ 78–6,250 มก./ล. เช่นเดียวกับค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 320–119,990 และ 45–43,000 มก./ล. ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับระยะเวลาอายุของบ่อบำบัด โดยน้ำหลังบำบัดแล้วพบว่ามีค่าบีโอดีลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ค่าซีโอดียังคงมีค่าสูงมากเนื่องจากน้ำเสียจากสาม้องค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพยากมาก จึงทำให้สารเหล่านั้นยังคงสะสมในน้ำเสียเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำเสียจากสาหลังผ่านการบำบัดแล้วมีธาตุอาหารอยู่สูงมาก โดยมีค่าไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นสูงถึง 6–2,080 มก./ล. ซึ่งน้ำเสียนี้นี้สามารถนำกลับไปใช้ในการเกษตรสามารถทดแทนการใช้ปุ๋ยได้

- **น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน**

น้ำล้างขวดและน้ำเสียจากอาคารสำนักงานที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ส่วนใหญ่จะใช้ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) และระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) น้ำทิ้งจากระบบดังกล่าวพบว่ามีคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งทั้งหมด น้ำหลังการบำบัดจะมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 1-16 มก./ล. ค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 14-200 มก./ล. ของแข็งแขวนลอย 1-68 มก./ล. ไนโตรเจนระหว่าง 2-670 มก./ล. และมีค่าพีเอชเป็นกลางถึงค่อนข้างเป็นด่าง (6.95-9.44) ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียจากการล้างขวดและอาคาร สำนักงานที่โรงงานใช้ยู่กำจัดบีโอดีและซีโอดีได้ในช่วงร้อยละ 83.91 และ 69.32 ซึ่งสูงมาก

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำกากส่า (กลุ่มบริษัทสุราทิพย์, 2542)

พารามิเตอร์น้ำเสียดิบ	ช่วงค่า
พีเอช	4.1-4.9
ซีโอดี (มก./ล.)	100,000-120,000
ซีโอดีกรอง (มก./ล.)	80,000-91,000
ไนโตรเจน (มก./ล.)	1,300-3,000
ซัลเฟต (มก./ล.)	4,000-9,800
ฟอสฟอรัส (มก./ล.)	100-180

2.1.4. การใช้ประโยชน์จากกากส่าในปัจจุบัน (ภาศัลย์ ใจรังสี, 2547)

การใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าของโรงงานผลิตสุรา มีการนำไปใช้ประโยชน์ยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของน้ำกากส่าจะพบว่าน้ำกากส่ามีองค์ประกอบต่างๆ ที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามมีผู้นำน้ำกากส่ามาใช้ประโยชน์บ้างดังต่อไปนี้

1. การนำน้ำกากส่ามาใช้ประโยชน์ในรูปของปุ๋ย โดยใช้หลักการ incineration ซึ่งกระทำได้โดยการใช้เครื่อง evaporator ที่ใช้ในโรงงานสุราบางยี่ขัน จังหวัดปทุมธานี ทำการเคี่ยวน้ำกากส่าจนงวดแห้ง โดยให้มีเนื้อของแข็งประมาณร้อยละ 50 จากนั้นนำเนื้อของของแข็งดังกล่าวพ่นเข้าไปในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้และยังได้ผลพลอยได้คือ ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีโปแตสเซียมในสัดส่วนที่สูงอีกด้วย ต่อมามีการนำหลักการดังกล่าวมาใช้กับน้ำกากส่าที่ได้จากโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสุรา

2. การนำน้ำกากสำมาใช้ทำปุ๋ยหมัก โดยอาศัยเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งปัจจุบันได้มีการค้นพบว่าจุลินทรีย์บางชนิด สามารถนำมาใช้สลายน้ำกากสำได้ ซึ่งใช้เวลาเพียง 1 เดือนเท่านั้น โดยมีวิธีการดังนี้ คือ นำน้ำกากสำดังกล่าวพ่นลงบนกองกากอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลหลังจากที่ตากกองกากอ้อยให้แห้งแล้ว กลับกองกากอ้อยด้วยรถแทรกเตอร์ แล้วพ่นน้ำกากสำลงบนกากอ้อยดังกล่าวอีก ทำดังที่กล่าวนี้สลับกันไป ก็จะได้ปุ๋ยหมักตามที่ต้องการ ซึ่งการผลิตปุ๋ยหมักดังกล่าวจะเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำกากสำประมาณ 24 บาท/การบำบัดน้ำกากสำ 1 ลบ.ม.

3. การนำน้ำกากสำมารดถนนลูกรังเพื่อลดฝุ่น (road spray) ซึ่งพบเห็นทั่วไปในเขตใกล้เคียงที่มีโรงงานผลิตสุราตั้งอยู่ วิธีนี้แม้จะเป็นการลดฝุ่นของถนนลูกรังแต่ก็สามารถใช้ได้ตลอดแล้งเท่านั้น เพราะในช่วงฤดูฝนน้ำกากสำเหล่านั้นจะถูกน้ำฝนชะล้างไป

4. การใช้น้ำกากสำในการเลี้ยงปลา (fish farming) จากการทดลองแม้ว่าจะใช้ได้ผล แต่ก็ใช้ในปริมาณที่จำกัด เนื่องจากหากใช้ในปริมาณที่มากไปแล้วจะเป็นอันตรายต่อปลาได้ ทั้งนี้เพราะจะทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลง

5. การนำน้ำกากสำมาเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตเป็นโปรตีนเซลล์เดียว เนื่องจากในน้ำกากสำมีน้ำตาลฟรุคโตสเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งพบว่ามียีสต์หลายชนิดสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตได้ดี ฉะนั้นในการนำน้ำกากสำมาเลี้ยงยีสต์ดังกล่าวเพียงแต่เติมแหล่งไนโตรเจนเพียงเล็กน้อย เช่น แอมโมเนียมซัลเฟต ยีสต์ก็สามารถเจริญเติบโตได้ดี หลังจากทำการแยกยีสต์ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนออกไปแล้ว พบว่าน้ำกากสำดังกล่าวมีค่าบีโอดีและค่าซีโอดีลดลง จึงเป็นการช่วยลดมลภาวะในน้ำกากสำได้อีกทางหนึ่งจากการเลี้ยงเชื้อ *S.cerevisiae* และ *Candida valida* ในน้ำกากสำสามารถผลิตโปรตีนได้ประมาณร้อยละ 45

6. การนำน้ำกากสำไปใช้ในการหมักก๊าซมีเทน การหมักดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์สารโดยจุลินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจนซึ่งผลที่ได้คือ ก๊าซผสมซึ่งมีก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 60 คาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 30 และไฮโดรเจนซัลไฟด์กับ stabilized sludge (ซึ่งนำไปใช้เป็นปุ๋ย) สำหรับก๊าซมีเทนที่ได้นั้นจะถูกนำไปใช้เผาไหม้ทำให้เกิดพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในกิจกรรมอื่นๆ ของโรงงานต่อไป

7. มีการนำน้ำกากสำไปใช้ในการเลี้ยงกุ้งเพื่อปรับสภาพน้ำ แต่มีอัตราส่วนการใช้น้อย เพราะอาจจะทำให้กุ้งตายได้ง่าย แต่ผลจากการใช้น้ำกากสำนี้จะให้อัตราการรอดของลูกกุ้งสูงขึ้น และกินอาหารได้ดี มีการเติบโตที่รวดเร็ว

2.1.5. การบำบัดน้ำกากส่า

เนื่องจากโรงงานผลิตสุราทำให้เกิดปัญหามลภาวะแม่น้ำลำคลองปนเปื้อน จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของน้ำกากส่าที่เป็นน้ำทิ้งเสียก่อน ซึ่งจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชนต่างๆ โดยปัจจัยที่ควรพิจารณา คือ ชนิดและปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ตลอดจนสภาพที่จะใช้ในการสร้างระบบบำบัด (วันชัย วงศ์เทียนชัย, 2545) โดยระบบที่นิยมใช้ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางเคมี เคมีไฟฟ้า และทางชีวภาพ

1. กระบวนการบำบัดทางเคมี

การตกตะกอนสีน้ำกากส่าด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) โดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ เช่น สารส้ม ปูนขาว และเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) จากการศึกษาพบว่า สารเคมีที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนสีน้ำกากส่าด้วยสารเคมี คือ สารส้ม รองลงมาคือ เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และปูนขาว โดยปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีน้ำกากส่า คือ สารส้ม 35 กก./น้ำกากส่าสด 1 ลบ.ม. ซึ่งเสียค่าใช้จ่าย 197 บาท/น้ำกากส่าสด 1 ลบ.ม. (วันชัย วงศ์เทียนชัย, 2545)

2. กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระบวนการนี้ใช้หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลติกเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายนำไฟฟ้า เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักหรือองค์ประกอบของสีในน้ำ (ปาริชาติ หมั่นสีทา, 2547) ซึ่งการนำกระบวนการนี้มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำกากส่า ส่วนใหญ่ใช้เพื่อการกำจัดสีในน้ำกากส่า

3. กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการบำบัดน้ำกากส่าที่มีลักษณะสารอินทรีย์ในปริมาณสูงนั้น ทำให้กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้รับความสนใจมากกว่า ดังนั้นจึงนิยมใช้กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการแรกในการบำบัดและใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการบำบัดถัดไป (Nandy และคณะ, 2002 อ้างถึงใน Satyawalic และ Balakrishman, 2008)

การใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวต้องการพลังงานปริมาณมากในการเติมอากาศหรือการทำให้เย็น (cooling) นอกจากนี้ร้อยละ 50 ของปริมาณซีโอดีจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสแลคซ์ (Sennitt, 2005 อ้างถึงใน Satyawali และ Balakrishnan, 2008) ซึ่งตรงข้ามกับกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการเปลี่ยนปริมาณซีโอดีมากกว่าร้อยละ 50 เป็นก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (Wilkie และคณะ, 2004 อ้างถึงใน Satyawali และ Balakrishnan, 2008)

2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.2.1 กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

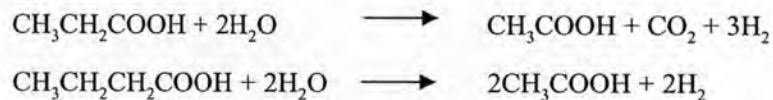
ไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัย เอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่อีกครั้งจนมีโมเลกุลเล็กจนสามารถผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าสู่ภายในเซลล์แบคทีเรียสร้างกรดได้ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก่อนข้างข้างจึงเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

2. การสร้างกรด (Acidogenesis)

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น อะซิติก บิวไทริก โพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก ชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารตั้งต้นและความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติกและไฮโดรคาร์บอนภายใต้สภาวะที่ความดันของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นบิวไทริกและโพรไพโอนิกเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นอะซิติก ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิธี Embden-Meyerhof ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำ หากไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูงผลผลิตที่ได้ คือ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

3. การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

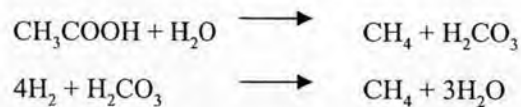
แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (แบคทีเรียสร้างอะซิเตท) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนในการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารตั้งต้นเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศสำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริก และกรดโพรไพโอนิก ตามลำดับ



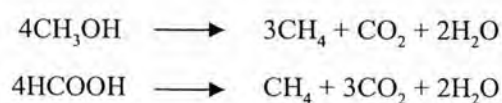
ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง

4. การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

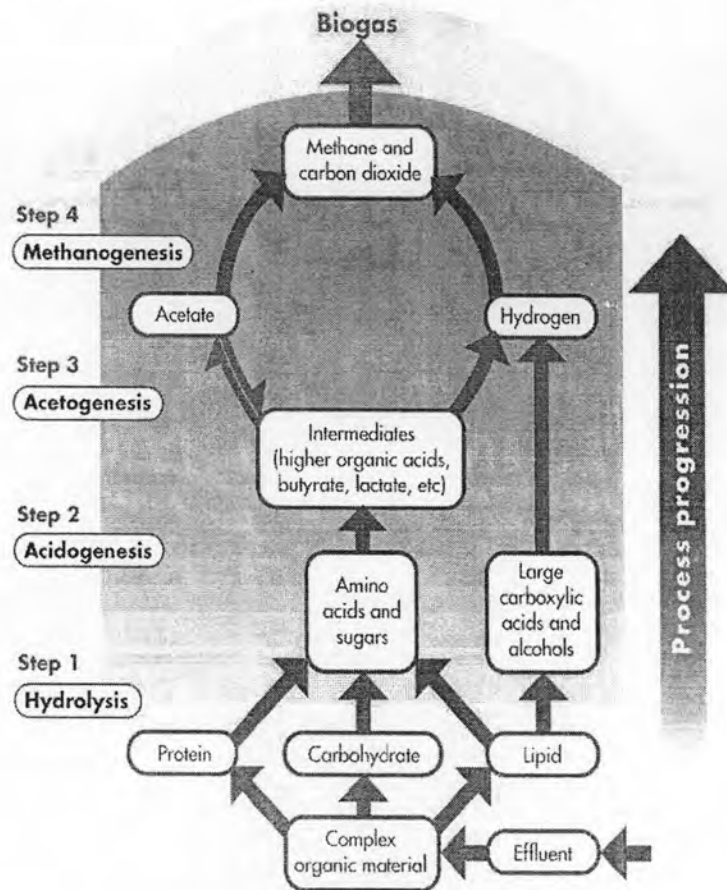
กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด



กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติก หรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้วแบคทีเรียอาจใช้สารตั้งต้นอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก (HCOOH)



แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา : Wheatley และคณะ, 1997

2.2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสามารถจำแนกได้ดังนี้ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

1. แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria)

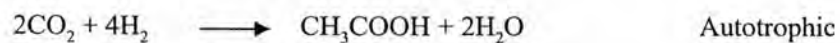
ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไร้ออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) มากกว่าชนิด Facultative ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียชนิดเด็ดขาดมีจำนวนมากกว่า แบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหยก็คือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบจึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลายชนิด เช่น กรดบิวไทริก

กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionic bacterium ที่ผลิตกรดโพรไพออนิก (Propionic Acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก

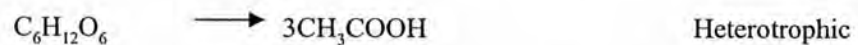
2. แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้นและบางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลที่เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้จึงมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ได้ ในเซลล์ แบคทีเรียที่ย่อยกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

- **แบคทีเรียผลิตอะซิเตทอย่างเดียว (Homoacetogenic Bacteria)** แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน) ผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Acetyl-CoA ตัวอย่างแบคทีเรียชนิดนี้ได้แก่ *Acetobacterium woodii* และ *Clostridium aceticum* สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบออโตโทรฟิก (autotrophic) คือ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติก



อีกทั้งเจริญเติบโตในแบบเฮเทโรโทรฟิก (Heterotrophic) ก็ได้โดยการหมักน้ำตาลดังสมการ



แบคทีเรียที่อยู่ในจีนัส *Clostridium* พบอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ

- **แบคทีเรียที่สร้างอะซิเตทที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H_2 -Producing Acetogenic Bacteria)** แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร และสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญเพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามแบคทีเรียชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพังทั้งนี้เพราะเมื่อมี

การสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา (ทำให้มีความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนสูง) ปฏิกริยาสร้างกรดอะซิติกไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อนแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเข้ามาบทบาทในตรงนี้เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้

การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า Syntrophy และต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทนส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

3. แบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็คขาดไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีเพียงเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทอโรโทรฟดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประมาณ 10 ชนิดเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2

สารอาหารชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ไม่ว่าจะเป็นกรดไขมันระเหย เช่น บิวทิริก หรือ โพรไพรอนิกซึ่งปกติเป็นสารอาหารของแบคทีเรียรีดิคัลเฟด แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้

แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของสารอาหารที่ใช้ได้แก่

- เมทานोजินที่ใช้เฉพาะอะซิเตท (Obligate Acetoclastic Methanogen) เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ตามสมการดังนี้



- เมทานोजินที่ใช้เฉพาะไฮโดรเจน (Obligate Hydrogenotrophic Methanogen หรือ Hydrogen Utilizer) เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ตามสมการดังนี้



นอกจากก๊าซไฮโดรเจนแล้วแบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นแหล่งอาหารเพียงอย่างเดียวเพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้

• เมทานोजินที่ใช้ได้ทั้งไฮโดรเจนและอะซิเตท (Hydrogenotrophic/Acetoclastic Methanogen) เป็นแบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน แต่ใช้ไฮโดรเจนได้ดีกว่า

ตารางที่ 2.2 สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ชั้นสเตรตประเภทคาร์บอนไดออกไซด์		
คาร์บอนไดออกไซด์		
$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$	\longrightarrow	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \quad ; \Delta G^{0'} = -131 \text{ kJ/reaction}$
ฟอร์มेट, HCOO^-		
$4 \text{HCOO}^- + 4 \text{H}^+$	\longrightarrow	$\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \quad ; \Delta G^{0'} = -145 \text{ kJ/reaction}$
คาร์บอนมอนอกไซด์, CO		
$4 \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	\longrightarrow	$\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 \quad ; \Delta G^{0'} = -210 \text{ kJ/reaction}$
ชั้นสเตรตประเภทเมทิล		
Methanol, CH_3OH		
$4 \text{CH}_3\text{OH}$	\longrightarrow	$3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \quad ; \Delta G^{0'} = -319 \text{ kJ/reaction}$
Methylamine, CH_3NH_2^+		
$4\text{CH}_3\text{NH}_2^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	\longrightarrow	$3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{NH}_4^+ \quad ; \Delta G^{0'} = -230 \text{ kJ/reaction}$
Dimethylamine, $(\text{CH}_3)_2 \text{NH}_2^+$		
$(\text{CH}_3)_2 \text{NH}_2^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	\longrightarrow	$3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{NH}_4^+ \quad ; \Delta G^{0'} = -230 \text{ kJ/reaction}$
Trimethylamine, $(\text{CH}_3)_3 \text{NH}^+$		
$4(\text{CH}_3)_3 \text{NH}^+ + 6\text{H}_2\text{O}$	\longrightarrow	$9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4 \text{NH}_4^+ \quad ; \Delta G^{0'} = -666 \text{ kJ/reaction}$
Methylmercaptan, CH_3SH		
Dimethylsulfide, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$		
อะซิเตท		
Acetate, CH_3COO^-		
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+$	\longrightarrow	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \quad ; \Delta G^{0'} = -31 \text{ kJ/reaction}$

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ แบคทีเรียไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้แบคทีเรียเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้อย่างดี การควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้แบคทีเรียอยู่ในสภาวะสมดุลกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางด้านการทำงาน (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

1. ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factor)

1) อุณหภูมิ (Temperature)

ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50–65 องศาเซลเซียส โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Thermophilic Bacteria
- ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20–45 องศาเซลเซียส โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Mesophilic Bacteria
- ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5–15 องศาเซลเซียส โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Psychrophilic Bacteria

สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในช่วงเทอร์โมฟิลิก แบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าในช่วงมีโซฟิลิก โดยสามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิกประมาณร้อยละ 20–50 ดังนั้นสำหรับในต่างประเทศที่อยู่ในเขตกึ่งร้อนจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำทิ้งแต่สำหรับประเทศไทยนั้นระบบบำบัดจะทำงานอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกได้เองโดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วย แม้ว่าประสิทธิภาพของระบบในช่วงมีโซฟิลิกจะดีน้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของค่าใช้จ่าย พบว่าค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนจะแพงมาก ทำให้ผู้ออกแบบในประเทศไทยไม่นิยมที่จะออกแบบระบบบำบัดให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

นอกจากนี้แบคทีเรียยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการออกแบบระบบจึงควรมีการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของระบบมีการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2–3 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนอย่างมาก การรักษา

อุณหภูมิของระบบให้มีความสม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าการควบคุมให้ระบบมีอุณหภูมิอยู่ในจุดที่ให้อัตราการย่อยสลายสูงสุด (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

2) พีเอช (pH)

แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชมากที่สุด โดยขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ (Methanogenesis) จะเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 6.8–7.2 และพีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7.0 ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (Acidogens) สามารถอาศัยอยู่ในสภาพที่พีเอชระหว่าง 5.0–8.0 นอกจากนี้ค่าพีเอชยังส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยจะส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นหรือออสโมของสารต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) แอมโมเนีย (NH_3) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ บางครั้งได้แยกขั้นตอนของการสร้างกรดและการสร้างมีเทนออกจากกัน (Two Stage Anaerobic Reactor) เพื่อที่จะทำให้สามารถย่อยสลายน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสหรือส่วนที่มีองค์ประกอบเป็นไฟเบอร์บางส่วนก่อน เช่น การหมักขยะอินทรีย์ เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

3) กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid: VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ซึ่งจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีส่วนสำคัญต่อค่าพีเอชของระบบ คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้นพีเอชจะต่ำลง ระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มก./ล. หรืออัตราส่วนของกรดโพรไพโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ อัตราของการเปลี่ยนกรดโพรไพโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมดุลของระบบ โดยที่ถ้ามีกรดโพรไพโอนิกเหลืออยู่ในถังเป็นปริมาณมากอัตราการเกิดก๊าซก็จะลดลงทำให้ระบบล้มเหลวได้ (อาริยา วิรัชวรกุล, 2546)

4) ความเป็นด่าง (alkalinity)

ความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ความเป็นด่างนี้จะเพียงพอที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยภายในระบบเพิ่มสูงขึ้นความเป็นด่างไบคาร์บอเนตก็จะถูก

ทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้ เป็นสาเหตุทำให้พีเอชลดลง (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

5) สารอาหาร (nutrient)

สารอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอาหารหลัก (macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) และสารอาหารรอง (micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) และนิกเกิล (Ni) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 150:1.1:0.2 (อารียา วิรัชวรกุล, 2546) โดยใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีนและฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นในการควบคุมสถานะให้เหมาะสมจึงต้องใส่สารอาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการเพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

6) สารพิษ (toxic substance)

สารบางอย่างถ้ามีความเข้มข้นสูงเกินไปจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษ ตัวอย่างสารพิษ ได้แก่

- อีออนประจุบวกของโลหะเบา (light metal cation) อีออนประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชในระบบจะมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษของมันเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของอีออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด (อารียา วิรัชวรกุล, 2546) แสดงดังตารางที่ 2.3

ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดรุนแรงไม่เท่ากัน อีออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่า อีออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ซึ่งพิษของแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จะมากกว่าพิษของโซเดียม (Na^+) และโพแทสเซียม (K^+) ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซ์สูงขึ้น ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบา นั้นสามารถลดลงได้ถ้ามีอีออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วย โดยจะทำให้ความเป็นพิษของ อีออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดแรกลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า แอนตาโกนิซึม (antagonism) แต่ในทางตรงกันข้ามอีออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของ

อื้ออนประจวบของโลหะเบากษนิคหนึ่งเมื่อมีอยู่ร่วมกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ซินเนอจิม (synergism) (อวัตดา ฉลนวุฒัน, 2545)

ตารางที่ 2.3 ความเข้มขันของอื้ออนประจวบของโลหะเบากษนิคที่มีผลกระตุ้นและยับยั้งการทํางานของ จุลินทรีย์ (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

อื้ออนประจวบ	ความเข้มขัน (มก./ล.)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
โซเดียม	100–200	3,500–5,500	8,000
โพแทสเซียม	200–400	2,500–4,500	12,000
แคลเซียม	100–200	2,500–4,500	8,000
แมกนีเซียม	75–150	1,000–1,500	3,000

• ก๊าซบางชนิด

- แอมโมเนีย (ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เช่น โปรตีนเป็นแอมโมเนียในไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอื้ออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 จะมีแอมโมเนียมอื้ออน (NH_4^+) มากกว่า แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 จะมีก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) มากกว่าซึ่งจะยับยั้งการทํางานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่าแอมโมเนียมอื้ออน (NH_4^+) แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มขันประมาณ 100 มก./ล. แต่ในรูปของ NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มขันสูงเท่ากับ 7,000–9,000 มก./ล. (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

- ซัลไฟด์ (sulfide) เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจนจากซัลเฟต (sulfate) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบหรือเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์ เช่น โปรตีน ซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำและที่มีความเข้มขันสูงกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลึกที่ไม่ละลายน้ำขึ้นดังนั้นการเติมโลหะบางชนิด เช่น เหล็กสามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนั้นความเข้มขันของซัลไฟด์ละลายขึ้นอยู่กับพีเอชของของเหลวและส่วนประกอบของก๊าซ (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

- โลหะหนัก (heavy metal) ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งอิออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสีย นั้น เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ถ้าของเสียมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไป เกลือทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้ (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

2. ปัจจัยทางด้านการทำงาน (operational factor)

1) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบและเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียในปริมาณพอเหมาะกับความเข้มข้นสารอินทรีย์ จึงจะทำให้แบคทีเรียมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุลในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็ม ประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าในการลงทุน และยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ผลที่อาจจะตามมาคือระบบอาจจะล้มเหลวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามค่าของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามธรรมชาติและชนิดของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องปรับค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ใช้ด้วย สำหรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบ หาได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ หรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

2) เวลาพักพักชลศาสตร์ (Hydraulic Retention Time, HRT)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อัตราเร็วของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาพักพักสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกชะออกจากระบบ (wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าจุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่จุลินทรีย์ถูกชะออกจากระบบได้โดยการเพิ่มเวลาพักพักชลศาสตร์

ให้นานขึ้น นอกจากนี้เวลากักพักชลศาสตร์จะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบอีกด้วย (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

3) การกวน (mixing)

การกวนเป็นการทำให้ของเหลวและส่วนผสมที่อยู่ในระบบมีการผสมและกระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ช่วยให้ของเสียที่เข้ามาใหม่เข้าไปแทนที่ของเสียที่ถูกย่อยสลายแล้ว ทำให้ระบบมีการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การกวนยังช่วยป้องกันมิให้มีการแยกชั้นของของเสีย ซึ่งการแยกชั้นของของเสียจะสร้างปัญหาให้กับระบบ โดยตะกอนลอยค้ำบนสุด (Scum) จะทำให้ประสิทธิภาพในการสร้างก๊าซมีเทนและเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในระบบลดลง ในทางปฏิบัติสามารถลดปัญหาการเกิดชั้นตะกอนลอยได้โดยการเพิ่มการกวนให้แก่ระบบ ถ้าหากระบบมีสภาพความเข้มข้นของแข็งต่ำ (ความเข้มข้นสารแขวนลอยน้อยกว่า 500 มก./ล.) และมีสารที่มีเส้นใยอยู่ไม่มากสามารถใช้การหมุนเวียนของเหลวหรือก๊าซที่เกิดขึ้นในถังเพื่อกวนผสมน้ำเสียได้ แต่หากระบบมีแนวโน้มการสะสมตัวของตะกอนลอยค่อนข้างสูงหรือสารแขวนลอยในน้ำเสียนี้อาจมาก จำเป็นต้องใช้การกวนโดยใช้เครื่องมือทางกล เช่น ใบกวน เป็นต้น (อารียา วิรัชวรกุล, 2546)

2.3 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic Baffled Reactor: ABR)

ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่มีอัตราการบำบัดสูง ประกอบด้วยชุดแผ่นกั้นที่ติดตั้งในแนวตั้ง เพื่อบังคับทิศทางการไหลลงและไหลขึ้นของน้ำเสียผ่านแผ่นกั้นดังกล่าว ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้มากขึ้น เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ความสกปรกของน้ำเสียจึงลดลงตามลำดับ จุลชีพภายในถังปฏิกรณ์จะเคลื่อนที่ขึ้นอย่างช้าๆและจะตกตะกอนตามลักษณะของการไหลและการเกิดก๊าซ (Barber และ Stuckey, 1999) ซึ่งเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียที่เป็นสารละลายและน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยเล็กๆ (กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิธม, 2550)

2.3.1 การศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน

ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย McCarty และคณะ ที่มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (McCarty, 1981 อ้างถึงใน Wang, Huang และ Zhao, 2004) จากนั้นมีการศึกษาและพัฒนาาระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการออกแบบและติดตั้งระบบ ABR ในระยะแรกนั้น มีแรงผลักดันจากความต้องการเพิ่มความสามารถในการกักพักของแข็งไว้ในระบบ แต่ต่อมาก็ได้มีการประยุกต์ใช้

กับน้ำเสียที่บำบัดได้ยากซึ่งประกอบด้วยของแข็งในปริมาณสูงหรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างระบบ (Barber และ Stuckey, 1999)

Fannin และคณะ (1981 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ทดลองเพิ่มแผ่นกั้นแนวตั้งในระบบไหลตามความยาวสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตสาหร่ายทะเลเข้มข้น (high solid sea kelp slurry) เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบในการรักษาปริมาณของแบคทีเรียผลิตมีเทน โดยใช้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์คงที่ 1.6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่า เมื่อจำนวนแผ่นกั้นเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 จนมีค่ามากกว่าร้อยละ 55 การศึกษาในระยะต่อมา Bachmann และคณะ (1983 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้น 2 แบบ คือ ระบบที่มีส่วนที่น้ำไหลลงขนาดปกติและเมื่อปรับขนาดให้แคบลง พบว่าระบบที่มีการปรับขนาดมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนและประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นแต่สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลง

ต่อมาได้มีการออกแบบผสมผสานหลายอย่างเข้าด้วยกัน โดย Tilche และ Yang, (1987 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) โดยมีแรงจูงใจมาจากความต้องการเพิ่มระยะกักพักของแข็งในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยใช้ระบบที่ห้องขนาดใหญ่กว่าที่เคยใช้กันมาและมีห้องรวมตะกอนของแข็งเพิ่มขึ้นมาเพื่อเก็บของแข็งที่หลุดออกไปจากระบบแล้วทำการหมุนเวียนกลับมาที่ห้องที่ 1 อีกครั้ง และมีการเติมตัวกลาง Pall rings ที่ตำแหน่งผิวน้ำในห้องที่ 1 และ 2 ส่วนในห้องที่ 3 เติมตัวกลางที่มีลักษณะเป็นท่อนลูกฟูกใส่ชั้นหนากว่าใน 2 ห้องแรก โดยตัวกลางจะช่วยรักษาตะกอนชีวภาพในห้องที่ 1 ไม่ให้ลอยขึ้นไป เนื่องจากการผลิตก๊าซที่มากจะลดความหนาแน่นของตะกอนจุลชีพ

Chynoweth และคณะ (1980 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) พบว่าการหมุนเวียนน้ำทิ้งกลับเข้าสู่ระบบในปริมาณร้อยละ 20 จะเพิ่มก๊าซมีเทนได้มากกว่าร้อยละ 30 Nichaiyasit (1995 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) พบว่า dead space จะเพิ่มมากขึ้นเป็น 2 เท่า (ประมาณร้อยละ 40) เมื่อสัดส่วนการหมุนเวียนตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 2 Barber และ Stuckey (1999) กล่าวว่า การปั่นกววนที่เกิดขึ้นในระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกส่วนที่สร้างกรดและส่วนที่สร้างมีเทนออกจากกันลดลงบางส่วน และระบบที่มีจำนวนห้องมากกว่าจะสามารถต้านทานต่อปริมาณน้ำและสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมากขึ้นไปได้

2.3.2 ข้อดีและข้อด้อยของระบบแผ่นกันไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อด้อยของระบบแผ่นกันไร้ออกซิเจน (Barber และ Stuckey, 1999)

ข้อดี	ข้อด้อย
1. ไม่ต้องใช้เครื่องจักรในการกวนผสม	1. หากเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสูงเกินไป อาจเกิดการ wash out ของตะกอนจุลชีพออกจากระบบได้ และอาจทำให้เกิด dead space เพิ่มมากขึ้น
2. ออกแบบระบบง่าย ค่าดำเนินการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ	
3. ลดการอุดตันในระบบและลดการขยายตัวของชั้นตะกอน	
4. การกักเก็บตะกอนจะถูกดักและตกตะกอนภายในแต่ละหน่วยย่อย	
5. สามารถกักเก็บตะกอนภายในระบบหรือป้องกันการหลุดออกของตะกอนได้ดี มีตะกอน จุลชีพสะสมในระบบสูง	
6. มี HRT สั้นและสามารถเดินระบบแบบไม่ต่อเนื่องได้	
7. ระบบมีความคงตัวได้ดี แม้จะมีการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง	
8. แบ่งแยกการบำบัดออกเป็น 2 ขั้นตอนได้อย่างชัดเจน คือ ขั้นตอนผลิตกรดและมีเทน	
9. มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมภายในระบบ เช่น พีเอช อุณหภูมิ	

2.4 การหมุนเวียนน้ำทิ้ง (Effluent Recycle)

การหมุนเวียนน้ำทิ้งกลับเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้เกิดการเจือจางหรือลดความเข้มข้นของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงและทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียรวมเข้าสู่ระบบบำบัดคงที่ ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน (Barber และ Stuckey, 1999) อัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้งที่เหมาะสมจึงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด การเพิ่มอัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง (R) ที่มากเกินไปช่วงหนึ่งไปจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ลดลงซึ่งไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (Yu และคณะ, 2002) โดยที่ R ต่ำ (R = 1-3) ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด เพราะเป็น R ที่เหมาะสมต่อการบำบัดหรือเรียกว่า R_{max} แต่เมื่อ R เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงตามลำดับ เพราะมีค่า R เกิน R_{max} (Barber และ Stuckey, 1999)

$$\text{อัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง (Effluent Recycle ratio: R)} = \frac{\text{Recycle Flow Rate (L/d)}}{\text{Influent Flow Rate (L/d)}}$$

2.4.1 ข้อดี และข้อด้อยของการหมุนเวียนน้ำทิ้ง

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อด้อยเสียของการหมุนเวียนน้ำทิ้ง (Barber และ Stuckey, 1999)

ข้อดี	ข้อด้อย
1. ลดความเข้มข้นหรือเจือจางความเข้มข้นของน้ำเสีย	1. ทำให้เกิดการหลุดออกของตะกอนเพิ่มขึ้น
2. สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่าที่เป็นไปได้	2. ตะกอนจุลินทรีย์อาจแตกได้เมื่อมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้งสูงเกินไป
3. สารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้ดีขึ้น	
4. ลดความเป็นพิษของสารที่ยังมีอยู่ในน้ำเสีย	
5. เพิ่มอัตราการกวนผสมระหว่างน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น	

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การบำบัดน้ำกากส่า

ชุติมา ฉันท์พลากร (2551) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดซีโอดีจากน้ำกากส่า โดยใช้ระบบแผ่นกั้น ไร้ออกซิเจน ระดับห้องปฏิบัติการขนาด 20 ลิตร จำนวน 3 ชุด การทดลอง มีการควบคุมอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1.5, 3 และ 5 ลิตร/วัน โดยมีความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 4,500, 7,500 และ 15,000 มก./ล. ซึ่งคิดเป็นภาระซีโอดีอยู่ระหว่าง 0.30–3.71 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.–วัน พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีเข้าระบบ และที่ความเข้มข้นของซีโอดีสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง (15,000 มก./ล.) ในอัตราการไหลที่ 1.5, 3 และ 5 ลิตร/วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีใกล้เคียงกัน แต่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 5 ลิตร/วัน มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 31.13 ลิตร/วัน โดยคิดเป็น 2 และ 4.5 เท่าของการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 3 และ 1.5 ลิตร/วัน ตามลำดับ โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงที่สุดมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 80

Baloch และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบ Granular-bed anaerobic baffled reactor (GRABBR) ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานกลั่นสุราเมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะในการเดินระบบ พบว่า เมื่อทำการเดินระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.16–13.38 กก.ซีโอดี/ ลบ.ม.–วัน สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 93–96 และผลิตก๊าซมีเทนสูง

Ratanatamskul และ Nuntiwawat (2006) ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และความเร็วไหลขึ้นต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและโครงสร้างของเม็ดตะกอนโดยระบบอีจีเอสบีในการบำบัดน้ำกากส่าจากโรงงานสุรา โดยกำหนดให้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 5, 10 และ 15 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.–วัน ความเร็วไหลขึ้นของถังปฏิกรณ์เป็น 3 และ 5 เมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าที่ความเร็วไหลขึ้น 3 เมตร/ชั่วโมง ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 1.4, 4.5 และ 5.7 ลิตร/วัน เมื่อเปลี่ยนความเร็วไหลขึ้นเป็น 5 เมตร/ชั่วโมง ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงเดียวกับที่ความเร็วไหลขึ้น 3 เมตร/ชั่วโมง อัตราการเกิดก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดอยู่ในช่วง 100–280 ลิตร/กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด–วัน ทั้งความเร็วไหลขึ้น 3 และ 5 เมตร/ชั่วโมง และจากการทดลองได้เพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 15 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.–วัน เป็น 25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.–วัน ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 9.0–9.5 ลิตร/วัน ทั้งสองความเร็วไหลขึ้นและส่งผลต่อโครงสร้างเม็ดตะกอน โดยจะทำให้โพรงช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น

ภาศัลย์ ใจรังสี (2547) ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา โดยใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนซึ่งจมตัวอยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ใช้น้ำกากส่าที่ออกจากหมัก โดยน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบนำมาจากน้ำกากส่าที่ออกจากหมัก แล้วนำมาเจือจางด้วยน้ำประปา 227, 200 และ 133 เท่า อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ 0.22, 0.25 และ 0.375 กก.บีโอดี/กก.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน ตามลำดับ และแบ่งเป็น 3 การทดลองคือ การทดลองที่ 1 ศึกษารอบการเติมอากาศที่ 60 นาที และ 90 นาที ผลปรากฏว่า การกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัส และสี มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่รอบการเติมอากาศ 90 นาที สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดีกว่าเล็กน้อย คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม จึงสรุปได้ว่า รอบการเติมอากาศที่ 60 นาทีเพียงพอต่อการดำเนินการในงานวิจัยนี้ การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อระบบ ซึ่งใช้อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ ที่ 0.22, 0.25 และ 0.375 กก.บีโอดี/กก.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน สามารถสรุปได้ว่าอัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ คุณภาพน้ำออกในแต่ละชุดการทดลองผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอายุตะกอนที่มีต่อระบบ พบว่า อายุตะกอนที่ 50 วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการดำเนินการมากกว่า โดยที่คุณภาพน้ำใกล้เคียงกันและผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม จากทั้ง 3 การทดลองสรุปได้ว่า ระบบที่เหมาะสมคือ รอบการเติมอากาศ 60 นาที และควบคุมอายุตะกอนที่ 50 วัน ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 96.67 กำจัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 87.77 กำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 98.32 และลคสีได้ร้อยละ 32.39 และมีค่าใช้จ่ายโดยไม่รวมค่าเสื่อมราคา 220 บาท/ลบ.ม.

สุนันท์ พูลธนกิจ (2547) ศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำกากส่าด้วยระบบยูเอเอสบี โดยทำการทดลองที่โรงงานสุรา องค์การสุรา กรมสรรพสามิต ใช้น้ำกากส่าจากบ่อปรับสภาพมีพีเอชอยู่ระหว่าง 4.1–4.6 และมีความเข้มข้นซีโอดี 150,000 มก./ล. ทำการศึกษาที่ HRT 3 ค่า คือ 1.09, 3.93 และ 13.10 วัน พบว่า ที่ HRT 1.09, 3.93 และ 13.10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 33, 37 และ 35 ตามลำดับ และมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.6, 1.4 และ 3.5 ลิตร/ปริมาณน้ำกากส่า 1 ลิตร ตามลำดับ

Blonskaja และคณะ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานกลั่นสุรา โดยใช้ระบบยูเอเอสบีและถังกรองไร้อากาศควบคู่กันเป็นระบบ 2 ชั้นตอน ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยน HRT จาก 10–19 วัน ที่อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ 2.5–5.1 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ในชั้นตอนแรก และเพิ่ม HRT เป็น 20–39 วัน อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ 0.6–2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ในชั้นตอนที่สอง พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 54 และ 93 ในชั้นตอนที่แรกและ

ขั้นตอนที่สอง ตามลำดับ ทีเอชในถังปฏิกรณ์สร้างมีเทน (ขั้นตอนที่สอง) อยู่ในช่วง 7.2–7.8 ผลิตก๊าซชีวภาพสูงในขั้นตอนที่สอง 6.1 ลิตร/วัน และในขั้นตอนแรก 1 ลิตร/วัน

Akunna และ Clark (2000) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบ Granular-bed anaerobic baffled reactor (GRABBR) ในการบำบัดน้ำเสียจากการกลั่นสุรา พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงได้ดีและมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงถึงร้อยละ 80 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 4.75 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จุลชีพที่พบในระบบคือแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยพบแยกกันในส่วนต้นและส่วนท้ายของระบบตามลำดับ ระบบ GRABBR มีการกักพักของตะกอนสูงและความเข้มข้นสารแขวนลอยที่วัดได้มีค่าประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตรในทุกสภาวะการทดลอง

2.5.2 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน

Bodkhe (2009) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่มีการตัดแปลงให้มีจำนวน 9 ห้อง ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยน HRT ช่วง 6 วัน–3 ชม. พบว่า ที่ HRT 6 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย, บีโอดี และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 86, 87 และ 84 ตามลำดับ ผลิตก๊าซชีวภาพ 0.34 ลบ.ม.มีเทน/กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด และมีสัดส่วนมีเทนร้อยละ 67 และพบว่าระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่มีการตัดแปลงเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศอินเดีย

Kuscu และ Sponza (2009) ศึกษาผลของการเพิ่มความเข้มข้นไนโตรเจนในและ HRT ในการบำบัดไนโตรเจนโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน พบว่า เมื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นไนโตรเจน 30 และ 210 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 88 และ 92 ตามลำดับ และสามารถกำจัดไนโตรเจนได้เกือบ 100% ผลิตก๊าซมีเทน 1500 มล./วัน และมีสัดส่วนมีเทนร้อยละ 48–50 และเมื่อลด HRT จาก 10.38 วัน เป็น 2.5 วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะลดลงจากร้อยละ 94 เป็นร้อยละ 92

She และคณะ (2006) ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอนจุลชีพ ผลของภาระบรทุกสารอินทรีย์ และสัดส่วนของ $\text{NaHCO}_3/\text{COD}$ ที่มีต่อประสิทธิภาพของแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีจำนวนห้อง 4 ห้อง ปริมาตร 90 ลิตร และใช้น้ำเสียซูโครสสังเคราะห์ในการทดลอง เมื่อทดลองเติมคาร์บอนแบบเม็ด (GAC) เปรียบเทียบกับดินเบนโทไนท์ (bentonite) ซึ่งเมื่อเติมร่วมกับโพลีเมอร์ชนิด polyacrylamide เพื่อเร่งการเกิดตะกอนจุลชีพ พบว่าตะกอนจุลชีพจะเกิดในถังปฏิกรณ์

ภายใน 75 วัน และ GAC มีผลให้ประสิทธิภาพการเกิดตะกอนจุลชีพสูงสุด โดยทำให้เกิดตะกอนในเวลาอันรวดเร็วและมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อทำการทดลองแปรผันค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 2.15–6.29 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยให้เวลากักพักชลศาสตร์คงที่ 20 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่ลดลง แม้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้น โดยพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 91–93 เมื่อทดลองแปรผันสัดส่วนของ $\text{NaHCO}_3/\text{COD}$ จาก 0.5–0.05 พบว่าการลดลงของสัดส่วน $\text{NaHCO}_3/\text{COD}$ ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 87–92 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของแบคทีเรียและความเข้มข้นของกรดไขมันระเหย พบว่า ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการแยกชั้นตอนและชนิดของแบคทีเรียออกจากกัน ได้เป็นอย่างดี

Wang และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพและคุณลักษณะของระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน จำนวน 5 ห้องในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ในสภาวะที่มีกรดไขมันระเหยชนิดต่างกัน อะซิเตทจะเป็นสารตัวกลางหลักในขั้นตอนการสร้างกรดของการย่อยสลายกลูโคส ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยจะลดลงตามความยาวของถังปฏิกรณ์ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ พบว่า ความเข้มข้นของมีเทนจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากห้องที่ 1 ไปยังห้องที่ 5 ขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนจะลดลงเรื่อยๆ จากห้องที่ 1 และไม่พบไฮโดรเจนใน 2 ห้องสุดท้าย ความว่องไวในการผลิตมีเทนของตะกอนจุลชีพในห้องต่างๆ ขึ้นอยู่กับสารอาหาร โดยกลุ่มจุลชีพที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่อาศัยอยู่ในแต่ละห้องจะต้องปรับตัวให้เหมาะสมกับความสามารถในการนำสารอาหารไปใช้และสภาวะแวดล้อมที่จำเพาะเจาะจง นอกจากนี้ยังพบว่าระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนมีศักยภาพในการรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงกว่าภายใต้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า และสามารถนำไปใช้ในกรณีที่มีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมและมีสารยับยั้งการเจริญของจุลชีพได้

Dama และคณะ (2003) ศึกษารูปแบบการไหลภายในระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนเพื่อพิจารณาลักษณะและองค์ประกอบของแผ่นกั้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและทดสอบการตกตะกอนของของแข็งในระบบ ในการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์แบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนขนาด 10 ลิตร จำนวน 8 ห้อง ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Computational fluid dynamic (CFD) ในการติดตามรูปแบบการไหลของสีในน้ำ พบว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวของส่วนที่น้ำไหลขึ้น (up-flow design) จะทำให้เกิดการกักพักตะกอนได้ดีขึ้นแต่หากเกินไปจะก่อให้เกิด dead space ได้ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นในตำแหน่งด้านข้างของห้อง โดยให้สัดส่วนความกว้างของส่วนที่น้ำไหลลง (down-flow design) ต่อส่วนที่น้ำไหลขึ้นเท่ากับ 1:3 จะทำให้เกิดการกักพักตะกอนได้ดีโดยไม่เพิ่ม dead space มากนักซึ่งได้ผลดีกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นไว้ตำแหน่งตรงกลาง

ห้อง พบว่า ความกว้างของห้อง (window width) ที่มากจะทำให้ลดการหมุนวนของน้ำได้ดีและแผ่นกั้นที่มีส่วนปลายตรงจะทำให้เกิด dead space ขึ้นบริเวณส่วนที่น้ำไหลขึ้นและบริเวณทิศทางที่มีการไหลขึ้น ส่วนแผ่นกั้นที่มีส่วนปลายทำมุม 45 องศากับพื้นราบจะช่วยลด dead space ดังกล่าวได้ และพบว่าการตกตะกอนของของแข็งในห้องที่ 1 จะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าในห้องที่ 3

2.5.3 ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง

ฤทธิชัย รัตนมุกดา (2552) ศึกษาอัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งต่อประสิทธิภาพและการทำงานของระบบยูเอเอสบีสองชั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเอทานอล โดยใช้ถังสร้างกรวดชนิดถังกวนผสมสมบูรณ์ขนาด 1.7 ลิตร ต่ออนุกรมกับถังสร้างมีเทนชนิดยูเอเอสบีขนาด 10 ลิตร อัตราสูบน้ำเข้าระบบเท่ากับ 3.5 ลิตร/วัน คงที่ตลอดการทดลอง โดยถังสร้างกรวดมีระยะเวลาพักกักขลศาสตร์ 0.5 วัน และถังสร้างมีเทนชนิดยูเอเอสบีมีระยะเวลาพักกักขลศาสตร์ 2.8 วัน ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และศึกษาผลที่สภาวะไม่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 1, 2 และ 3 พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราหมุนเวียนน้ำทิ้ง เมื่อไม่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ ร้อยละ 66.0 และเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 1 และ 2 เท่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีประมาณร้อยละ 69.6-71.9 แต่ที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 3 เท่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเหลือร้อยละ 65.8 และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง ที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งเท่ากับ 2 เท่า มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 13.8 ลิตร/วัน และมีร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 52.2

อุษณีย์ นาคะภากร (2551) ศึกษาผลของอัตราการหมุนเวียนน้ำเสียภายในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสุรา โดยใช้ระบบถังหมักไร้ออกซิเจน โดยให้น้ำเข้ามีความเข้มข้นซีโอดีคงที่เท่ากับ 5,000 มก./ล. ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ระยะเวลาพักกักขลศาสตร์คงที่ 20 วัน แล้วปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำเสียภายในระบบที่อัตราไหลเข้าต่ออัตราไหลเวียนกลับ 4 ค่า เท่ากับ 1:5, 1:10, 1:15 และ 1:20 พบว่าการหมุนเวียนน้ำเสียช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยที่อัตราไหลเข้าต่ออัตราหมุนเวียนน้ำเสียกลับ 1:0, 1:5, 1:10, 1:15 และ 1:20 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 41, 57, 62, 72 และ 75 ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.10, 0.12, 0.21, 0.37 และ 0.48 ลิตร/กรัม ซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยมีร้อยละของก๊าซมีเทน 45.14, 53.96, 52.23, 54.23 และ 55.43 ตามลำดับ และ

เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 0.25 เป็น 0.5 และ 1.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่อัตราการหมุนเวียนน้ำเสีย 1:20 พบว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสารแขวนลอย

กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิรณ (2550) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบแผ่นกันไร้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำยางขึ้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเถ้าไม้ยางพาราในสถานะที่มีการหมุนเวียนน้ำทิ้งในระบบ พบว่า ที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้ง (R) เท่ากับ 0 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียที่ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 82.71 และเมื่อ R เท่ากับ 0.3 และ 0.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีประมาณร้อยละ 63.32 ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติในชุดการทดลองดังกล่าว และที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้ง (R) เท่ากับ 0 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียที่ปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 80.77 และเมื่อ R เท่ากับ 0.3 และ 0.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีประมาณร้อยละ 56.91

ชวลิต รัตนธรรมสกุล และสุชัญญา ทองเครือ (2549) ศึกษาผลของสัดส่วนอัตราไหลเข้าต่ออัตราหมุนเวียนน้ำเสียกลับที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบบำบัดแบบบิโอดี โดยใช้น้ำเสียชุมชนประเภทอาคารเรียน จากอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเมื่อความเร็วไหลขึ้นคงที่เท่ากับ 4.5 เมตร/ชั่วโมง และเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอัตราไหลเข้าต่ออัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งกลับเป็น 1:3, 1:7, 1:11 และ 1:15 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 69.2, 72.6, 76.3 และ 74.6 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 72.7, 73.5, 76.6 และ 75.6 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 74.0, 77.4, 81.7 และ 73.3 ตามลำดับ และคุณภาพน้ำทิ้งออกจากระบบบิโอดีผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอาคาร

Yu และคณะ (2002) ศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตถั่วเหลืองแปรรูปภายใต้สภาวะที่มีและไม่มี การหมุนเวียนน้ำทิ้ง ใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 ค่า คือ 8.16, 11.3 และ 13.5 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน และใช้อัตราส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง (R) 6 ค่า คือ 1.0-6.0 พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.16 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน R เท่ากับ 3 สามารถกำจัดซีโอดีได้สูงสุดถึงร้อยละ 92.50 และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 11.3 และ 13.5 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน (R เท่ากับ 2) สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 91.30 และ 88.10 ตามลำดับ การผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นแต่องค์ประกอบของมีเทนจะลดลงเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำทิ้ง

Jeison และ Chamy (1999) เปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีและอีจีเอสบีโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตเบียร์เจือจางด้วยน้ำประปาให้มีค่าซีโอดีเหลือ 500 มก./ล. ความเร็วไหลขึ้น 1.8–10.5 เมตร/ชั่วโมง ในระบบอีจีเอสบีและความเร็วไหลขึ้น 0.6–1.3 เมตร/ชั่วโมง ในระบบยูเอเอสบีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งสองระบบใกล้เคียงกันคือร้อยละ 80 ลักษณะชั้นตะกอนในระบบยูเอเอสบีอัดแน่นกว่าระบบอีจีเอสบี อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดในระบบอีจีเอสบีลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วไหลขึ้น มีค่า 0.4–0.25 ลิตร/กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด เนื่องจากความปั่นป่วนของน้ำที่เกิดจากการเวียนน้ำเป็นผลทำให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นละลายลงในกระแสน้ำ (Outlet stream) ส่วนระบบยูเอเอสบีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.25 ลิตร/กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด มีค่าค่อนข้างดีที่สุดที่สุดในระบบอีจีเอสบีและระบบอีจีเอสบีมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าระบบยูเอเอสบีเพียงร้อยละ 5–10 สำหรับน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ