บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสุรา

สุราเป็นเครื่องดื่มที่ได้จากการผสมแอลกอฮอล์ (alcohol) น้ำ และส่วนผสมอื่นๆ เพื่อให้มีรสชาติและสีแตกต่างกันไป หากแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต จะแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1) สุราที่ผลิตจากเมล็ดธัญพืช (Grain Distilleries) ได้แก่ สุราประเภทสก๊อตวิสกี้ (Scotch Whiskey) สุราเกาเหลียง ซึ่งผลิตจาก ข้าวเหนียว ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวบาเล่ย์ เป็นต้น

2) สุราที่ผลิตจากผลไม้ (Fruit Distilleries) ได้แก่ สุราประเภทไวน์ (Wine) บรั่นดี (Brandy) แชมเปญ (Champagne) ซึ่งผลิตจาก สับปะรด องุ่น เป็นต้น

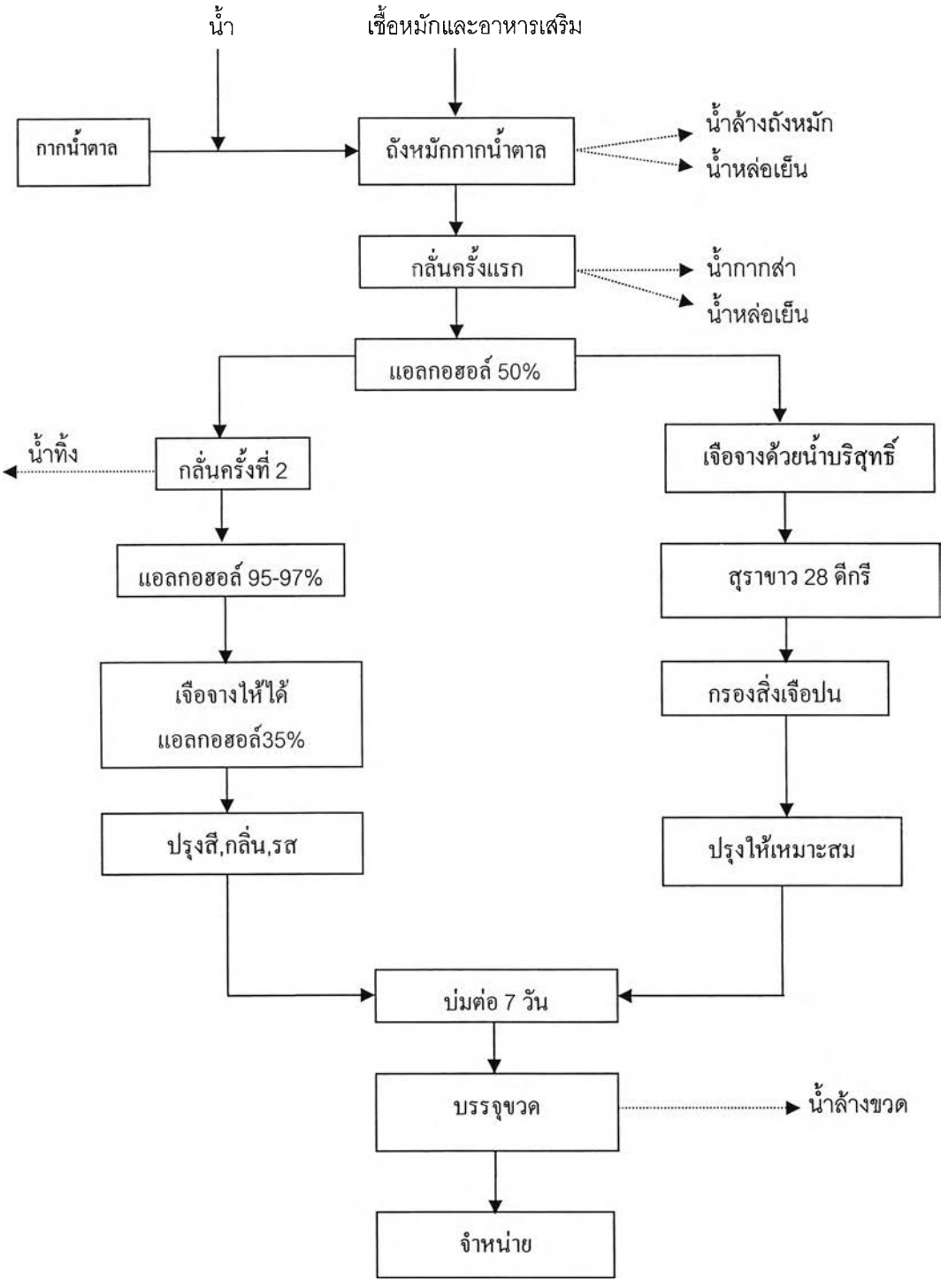
3) สุราที่ผลิตจากกากน้ำตาล (Molasses Distilleries) ได้แก่ สุราขาว สุราผสม รัม (Rum) ซึ่งผลิตโดยใช้โมลาสผสมกับข้าวเหนียว ซึ่งอัตราส่วนระหว่างโมลาสและข้าวเหนียวที่ใช้ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของแต่ละโรงงาน สำหรับประเทศไทยโดยมากใช้วัตถุดิบชนิดนี้ในการผลิต

2.1.2 กระบวนการผลิตสุราจากกากน้ำตาลแบ่งได้ 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ (รูปที่ 2.1) ได้แก่

1) <u>การหมักกากน้ำตาล</u> (Fermentation) กากน้ำตาล (molasses) เป็นผลิตผลที่เหลือจากการผลิตน้ำตาลที่ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตกผลึกได้ต่อไปอีก มีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการหมักจึงต้องเจือจางกากน้ำตาลด้วยน้ำ 3 เท่า แล้วจึงใส่เชื้อหมัก (yeast) ใช้สำหรับการหมักเพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ และอาหารเสริม เช่น แอมโมเนียฟอสเฟต และแอมโมเนียซัลเฟต การหมักใช้เวลาประมาณ 3 วัน โดยมีอุณหภูมิภายในถังหมักระหว่าง 34-35 องศาเซลเซียส และค่า pH เท่ากับ 4.0 จะได้แอลกอฮอล์ร้อยละ 8-10 โดยปริมาตร ส่วนผสมของแอลกอฮอล์ภายหลังการหมักนี้เรียกว่า เบียร์ (beer) หรือแมช (mash) หรือน้ำสา ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหอกลั่น

2) <u>การกลั่นแอลกอฮอล์</u> (Distillation) น้ำสาถูกส่งมายังหอกลั่นแรก เพื่อกลั่นแยกแอลกอฮอล์ออกมา ได้แอลกอฮอล์ประมาณร้อยละ 50 ซึ่งเรียกว่า สุรา ส่วนหนึ่งของที่กลั่นได้ถูกนำไปผลิตเป็นสุราขาว และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปกลั่นในขั้นต่อไป เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตร

3) <u>การผลิตสุราขาว</u> (Raw Alcohol Production) ส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์ร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งแรก จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 28 โดยปริมาตร หรือ 28 ^{0} (28 degree) เรียกว่า สุราขาว จากนั้นกรองเศษผงและสิ่งเจือปนออก ปรุงให้เหมาะสมและนำมาบ่มต่อประมาณ 7 วัน แล้วนำไปบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงกรรมวิธีการผลิตสุราจากกากน้ำตาลและจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสุรา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) <u>การผลิตสุราผสม</u> (Blended Liquor Production) นำแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95-97 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งที่สอง มาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร หรือ 35 ^{0} (35 degree) แล้วเติมสี ยาสมุนไพร และส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติตามความต้องการ จากนั้นนำมากรองและบ่มต่อประมาณ 7 วัน ก่อนบรรจุลงขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

2.1.3 ประเภทน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

น้ำทิ้งจากโรงงานสุราแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ น้ำเสียเข้มข้น และน้ำเสียเจือจาง

1) น้ำทิ้งประเภทเข้มข้น น้ำทิ้งส่วนนี้มีค่า BOD สูงประมาณ 2,500 – 35,000 กรัมต่อลบ.ม. ได้แก่ น้ำล้างถังหมัก และน้ำกากส่า ปริมาณน้ำทิ้งทั้งสองขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตของแต่ละโรงงาน เนื่องจากน้ำล้างถังหมักมีปริมาณน้อยประมาณ 5-10 ลบ.ม.ต่อวัน จึงนำไปกำจัดรวมกับน้ำกากส่า

2) น้ำทิ้งประเภทเจือจาง เป็นน้ำทิ้งที่มีค่า BOD ต่ำ ประมาณ 10-450 กรัมต่อลบ.ม. ได้แก่ น้ำล้างขวด น้ำหล่อเย็น และน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือน เป็นต้น น้ำทิ้งประเภทนี้ไม่นำมาบำบัดรวมกับน้ำกากส่า เนื่องจากมีค่า BOD แตกต่างกันมากและมีปริมาณสูง การแยกบำบัดจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า

น้ำกากส่าเป็นน้ำทิ้งซึ่งแยกออกจากหอกลั่นแรก (Mash Distilling Column) โดยทั่วไปน้ำกากส่าแบ่งได้ 2 ชนิด คือ กากส่าขาว ได้จากการใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบในการผลิต และกากส่าแดง ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ น้ำกากส่าจากโรงงานสุราเกือบทุกแห่งในประเทศไทยเป็นชนิดกากส่าแดง มีสีน้ำตาลเข้มหรือดำ มีฤทธิ์เป็นกรด และมีความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์สูง

ในกากน้ำตาล นอกจากจะมีน้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น ซูโครส (sucrose) กลูโคส ฟรุคโตส(fructose) และราฟฟิโนส (raffinose) ซึ่งเป็นสารคอปเปอร์รีดิวซ์ (copper reducing substance) ที่ยีสต์สามารถใช้ในการหมักแอลกอฮอล์แล้วยังมีสารคอปเปอร์รีดิวซ์อื่นๆ ที่ยีสต์ไม่สามารถใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่จะเป็นพวก คาราเมล (caramel) ของน้ำตาลต่างๆ ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีธาตุไนโตรเจนที่เกิดจากการที่น้ำตาลได้รับความร้อนมากเกินไปในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย และเมลานอยดิน (melanoidin) ซึ่งเป็นสารที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากการควบแน่นของน้ำตาลชนิดต่างๆ กับกรดอะมิโน (amino acid) ซึ่งจะมีสีน้ำตาลเข้ม และเป็นตัวทำให้กากน้ำตาลหรือน้ำกากส่ามีสีน้ำตาลเข้มขึ้นด้วย

2.1.4 การกำจัดน้ำกากส่า (molasses waste water treatment)

เนื่องจากน้ำกากส่า เป็นปัญหาอย่างมากเกี่ยวกับมลพิษ เมื่อโรงงานต่างๆทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลอง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำกากส่าก่อน โดยการแยกสิ่งสกปรกต่างๆ ตลอดจนสีน้ำตาลเข้มของน้ำกากส่านั้น ให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำที่รับน้ำทิ้งนั้น

จากรายงานของ สุจินต์ พนาปวุฒิกุล (2527) พบว่าในประเทศไทยได้มีการสร้างระบบกำจัดน้ำกากส่าหลายระบบด้วยกันในอดีต ตามความเหมาะสม อาทิเช่น

1) <u>การระเหยและเผา</u> (Evaporation and combustion) โดยจะเคี่ยวน้ำกากส่าให้เข้มข้นในหม้อเคี่ยวสแตนเลส เพื่อให้มีความเข้มข้นสูงถึง 60 % ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายน้ำมันเตาข้นหรือกากน้ำตาลข้น จากนั้นก็นำมาผสมกับไอน้ำและอากาศ และฉีดเข้าไปภายใต้ความดันสูงในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซนติเกรด แต่วิธีการนี้ค่อนข้างจะยุ่งยากและมีราคาแพง นอกจากนั้นยังอาจจะทำให้เกิดมลภาวะของอากาศ กล่าวคือ มีเถ้าถ่านปลิวออกมามากมาย และมีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกมาสู่อากาศเป็นจำนวนมากมีกลิ่นเหม็นรุนแรง และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แต่ผลพลอยได้คือ ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ในระบบหอกลั่นเพื่อลดค่าใช้จ่ายเมื่อใช้น้ำมันเตา และสารโปแตสเซียมที่เกิดขึ้นจากการเผาน้ำกากส่านี้นำไปใช้ประโยชน์ได้

2) <u>การระเหย</u> (Evaporation) วิธีนี้มักจะใช้ทดลองกับน้ำกากส่าปริมาณน้อยๆ โดยการเคี่ยวในกะทะขนาดใหญ่ที่มีปล่องควันระบายควันออก วิธีนี้ก็ต้องใช้พลังงานมากเช่นกัน โดยน้ำกากส่า 1 ลบ.ม. จะต้องใช้น้ำมันเตาถึง 28 ลิตร จะทำให้มีความเข้มข้นขึ้น 20 เท่าจากเดิม และน้ำกากส่าเข้มข้นที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นปุ๋ยในทางการเกษตรได้ดี

3) <u>การหมักในถังหมักไร้อากาศ</u> (Anaerobic digestion) และกระบวนการเติมอากาศเลี้ยงตะกอน (activated sludge process) โดยการหมักน้ำกากส่าในถังหมักชีวภาพเพื่อให้ได้แก๊สมีเทนมาใช้แทนน้ำมันเตา ปริมาณแก๊สมีเทนจะได้อยู่ในเกณฑ์ประมาณ 15-20 ลบ.ม. ต่อน้ำกากส่า 1 ลบ.ม. น้ำกากส่าที่ผ่านการหมักนี้แล้วจะมีค่า BOD ลดลงไปราว 80 % ซึ่งจะต้องนำไปบำบัดต่อโดยกระบวนการเติมอากาศเลี้ยงตะกอน ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก คือ ประมาณ 100-200 บาท ต่อ น้ำกากส่า 1 ลบ.ม. อย่างไรก็ตามน้ำกากส่าที่ผ่านการกำจัดโดยกระบวนการเติมอากาศเลี้ยงตะกอนแล้วยังมีสีน้ำตาลเข้มอยู่ และมีค่า BOD สูงเกินกว่าข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม และวิธีการกำจัดนี้ค่อนข้างซับซ้อน และต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญควบคุมการทำงานของระบบ แต่ข้อดีคือใช้เนื้อที่น้อย

4) <u>การทำปุ๋ยหมัก</u> (Composting) วิธีการโดยการขนเอาวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ชานอ้อย ขี้เถ้าแกลบ ขุยมะพร้าว เป็นต้น โดยนำมากองแล้วฉีดพ่นชานอ้อยด้วยน้ำกากส่าแล้วทำการกลับกองชานอ้อยเพื่อให้เกิดสภาพอากาศถ่ายเทได้โดยสะดวก นอกจากนี้ยัง

ต้องเร่งการหมักด้วยการใส่เชื้อหมักเพื่อให้เกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น เมื่อหมักเรียบร้อยแล้วจะได้ปุ๋ยหมักมีสีดำเข้มและมีประโยชน์ในการเกษตร วิธีการนี้ลงทุนครั้งแรกต่ำ แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงมาก คือ ประมาณ 100 บาท ต่อ ลบ.ม. และจะทำได้ดีเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น เพราะฤดูฝนจะมีปัญหาเกี่ยวกับการกลับกองปุ๋ย

5) <u>การทำบ่อเก็บกักและลานตาก</u> (Storage lagoon and land application) วิธีนี้ได้แก่การขุดบ่อเก็บกัก น้ำกากส่าตลอดฤดูฝน 6 เดือน เมื่อน้ำกากส่าเต็มบ่อเก็บกักแล้วก็จะเกิดการย่อยสลายตัวโดยจุลินทรีย์ในระยะ 6 เดือนนี้ ค่า BOD อาจลดลงตั้งแต่ 80-90 % แต่ค่า BOD ก็ยังคงสูงอยู่คือ ประมาณ 3,000-6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ จึงต้องนำไปกำจัดต่อด้วยการระบายน้ำกากส่ามาตากแห้งบนลานตากในฤดูแล้ง 6 เดือน โดยที่ลานตากนี้ทำหน้าที่คล้ายนาเกลือ และอัตราการระเหย ประมาณ 4 มิลลิเมตร/วัน ผลพลอยได้คือ กากส่าแห้ง ซึ่งมีเนื้อปุ๋ย เอ็น-พี-เค (N-P-K) อยู่มากกว่าปุ๋ยคอก 3-4 เท่าตัว และใช้ในทางการเกษตรได้ดีมาก วิธีการนี้เสียค่าใช้จ่ายน้อยมาก คือ ประมาณ 6 บาทต่อน้ำกากส่า 1 ลบ.ม. แต่อาจขายกากส่าแห้งได้ราว 10-20 บาท ต่อ ลบ.ม. นอกจากนี้การตากน้ำกากส่ายังช่วยทำลายสีโดยวิธีธรรมชาติอีกด้วย เพราะในฤดูฝนลานตากไม่ได้ใช้งานอะไร กากส่าแห้งที่ยังเหลือค้างอยู่บ้างก็จะละลายปนกับน้ำฝนและประกอบกับเชื้อจุลินทรีย์ในดินช่วยทำลายสีของน้ำกากส่าแห้งจนเกือบจะไม่มีสีค้างอยู่เลย

6) <u>ราดถนน</u> (road spray) เนื่องจากน้ำกากส่ามีสารลิกนินในตัว มีความเหนียวมากกว่าน้ำ และสามารถยึดฝุ่นให้อยู่แน่นคล้ายยางมะตอย และจะไม่มีฝุ่นไปนานกว่า 2 อาทิตย์ ดังนั้นจึงสามารถนำมาราดถนนถนนลูกรังได้ดี วิธีนี้จะใช้ได้เฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น เนื่องจากฤดูฝนถนนไม่มีฝุ่น ยกเว้นตอนฝนทิ้งช่วงเท่านั้น

7) <u>ใช้เป็นอาหารปลา</u> (fish farming) เป็นการใช้น้ำกากส่าเป็นอาหารทางอ้อมแก่ปลา เพราะน้ำกากส่าจะใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็ก เช่น แพลงก์ตอน เพื่อเป็นอาหารแก่ปลาอีกต่อหนึ่ง จากผลการทดลองพบว่า ถ้าใช้น้ำกากส่าสดในอัตรา 0.6 ส่วนในพันส่วน ต่อ 2 อาทิตย์ จะทำให้ปลาสลิดเจริญเติบโตได้สูงสุด วิธีนี้มีข้อจำกัดตรงที่ใช้น้ำกากส่าได้น้อยมาก กล่าวคือ บ่อขนาด 1 ไร่ ลึก 1 เมตร จะใช้น้ำกากส่าเพียง 1 ลบ.ม. ต่อ 2 อาทิตย์ ซึ่งถ้าใช้น้ำกากส่ามากไป จะทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง น้ำเกิดเน่าเหม็นและปลาอาจตายได้

8) <u>ใช้ในการเกษตรโดยตรง</u> (direct agriculture use) โดยการปล่อยน้ำกากส่าเข้านาข้าว ไร่อ้อย เป็นต้น โดยตรง โดยใส่ในฤดูแล้งหรือขณะที่นายังว่างอยู่หลังการเก็บเกี่ยว

ระบบการบำบัดทั้ง 8 แบบที่กล่าวมานี้ พบว่าแต่ละระบบก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียตลอดจนขีดจำกัดมากมาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบราคาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำกากส่าโดยวิธีต่างๆ พร้อมกับแสดงข้อดี และข้อเสีย (สุจินต์ พนาปวุฒิกุล,2527)

วิธีการบำบัดน้ำกากส่า	ผลพลอยได้สุทธิ (บาท/ลบ.ม.)	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ระบบระเหยและเผา	(-) 150	-ไม่มีปัญหามลภาวะทางน้ำ -ใช้เนื้อที่น้อย -ได้ผลพลอยได้ (ความร้อน, โปแตสเซียม)	-ปัญหามลภาวะทางอากาศ -การลงทุนระบบกำจัดสูง -เปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก
2. การระเหย	(-) 150	- ได้ปุ๋ยอินทรีย์เหลวมาใช้ -ใช้เนื้อที่น้อย	-ใช้ในสเกลเล็กๆในขณะนี้เท่านั้น -ค่าลงทุนสูง
3. การหมักและให้อากาศเลี้ยงตะกอน	(-) 140	-ได้แก๊สมีเทนมาใช้ -ใช้เนื้อที่น้อย	-ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเดินเครื่องแพงสำหรับการใช้อากาศเลี้ยงตะกอน -ผลการบำบัดไม่ผ่านมาตรฐานและมีปัญหาเรื่องสี
4. การทำปุ๋ยหมัก	(-) 100 (หากขายปุ๋ยไม่ได้)	-ได้ปุ๋ยมาใช้ -ลงทุนต่ำ	-ใช้เนื้อที่มาก -ค่าใช้จ่ายดำเนินงานสูง -มีข้อจำกัดในการทำงานฤดูฝน
5. การทำบ่อเก็บกักและลานตาก	(-) 6 (หากขายปุ๋ยไม่ได้)	-ได้ปุ๋ยเข้มข้นมาใช้ -ลงทุนต่ำ,ดำเนินการง่าย	-ใช้เนื้อที่มาก
6. ราดถนน	(-) 10 หากไม่ได้ค่าตอบแทน	-ลดปัญหาฝุ่นละออง -ลงทุนต่ำมาก	-ต้องขนส่งทางรถ
7. ใช้เป็นอาหารปลา	(-) 15	-ใช้เป็นอาหารปลา	-ใช้จำนวนน้อยมาก
8. ใช้ในการเกษตรโดยตรง	(-) 15 (หากใช้รถขนส่ง) (-) 5 (หากใช้ระบบท่อขนส่ง)	-เป็นปุ๋ยอินทรีย์	-ใช้ได้เฉพาะฤดูแล้ง -มีค่าดำเนินการอยู่บ้างโดยต้องควบคุมอัตราการใช้ให้เหมาะสม

ระบบการกำจัดน้ำกากสา ส่วนใหญ่อาศัยวิธีการทางชีววิทยาในการปรับคุณภาพของน้ำกากส่าให้ดีขึ้น ซึ่งอาจจะใช้ระบบการกำจัดโดยวิธีการไร้อากาศและให้อากาศ โดยระบบการกำจัดดังกล่าวเป็นเพียงการลดระดับของ COD และ BOD ให้ต่ำลงจนอยู่ในระดับที่ไม่เป็นปัญหาเกี่ยวกับมลพิษ เมื่อทิ้งลงในแหล่งนี้ แต่ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสีน้ำกากส่าได้ ดังนั้น น้ำกากสาดังกล่าวจึงต้องผ่านการกำจัดสีน้ำกากสาอีกขั้นตอนหนึ่งก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งนี้ ซึ่งในปัจจุบันได้อาศัยวิธีการทางเคมีตกตะกอนสีน้ำกากสา แต่ผลที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ตลอดจนต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก เช่น กรณีในการตกตะกอนน้ำกากส่าด้วยสารเคมี สารส้มต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง 197.4 บาท/น้ำกากส่า 1 ลบ.ม. , ปูนขาวต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง 343 บาท/น้ำกากส่า 1 ลบ.ม. และเฟอร์ริคคลอไรด์ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงถึง 695.4 บาท/น้ำกากส่า 1 ลบ.ม. (สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2524) ดังนั้นจึงมีผู้สนใจที่จะหาวิธีการทางชีววิทยาในการลดความเข้มของสีน้ำกากส่าโดยพยายามคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการฟอกสีน้ำกากส่าได้

2.2 การบำบัดชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงโดยวิธีชีวภาพนี้ ขั้นตอนแรกควรเป็นระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน เพราะเนื่องจากค่าใช้จ่ายสำหรับระบบนี้จะต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจนมาก นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้ 80-90% จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนที่ถูกนำไปสร้างเซลล์จะมีน้อยมาก ปัญหาในการกำจัดตะกอนจึงมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจนมาก ก๊าซชีวภาพที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตอีกด้วย แต่ข้อเสียที่สำคัญคือแบคทีเรียที่ใช้ในระบบบำบัดเจริญเติบโตช้าต้องใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบยาวนานมาก นอกจากนี้ในระบบจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ซึ่งมีกลิ่นเหม็น น้ำเสียอาจจะมีสีดำ เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับสารประกอบของโลหะต่างๆ ในน้ำเสียเกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ซึ่งมีสีดำ

2.2.1 ลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2536)

ปฏิกิริยาบำบัดน้ำเสียทั่วไปล้วนมีลักษณะพื้นฐานร่วมกันคือเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชั่น-รีดักชัน หรือ รีดอกซ์ ปฏิกิริยารีดอกซ์ หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้และสารรับอิเล็กตรอน ทั้งนี้พลังงานเคมีเป็นพลังงานส่วนใหญ่ที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ แหล่งของพลังงานเคมีก็คือสารอินทรีย์ซึ่งจำเป็นที่จะต้องเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดอกซ์ สารอินทรีย์

ในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพราะมีพลังงานในตัวสูงและสารอย่างอื่นที่อยู่ในน้ำจะเป็นสารรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนมีความแตกต่างอยู่ที่ประเภทของสารรับอิเล็กตรอน ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน ปฏิกิริยาก็เป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือแอโรบิค ถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช่ออกซิเจน แต่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือไนเตรดหรือซัลเฟต ปฏิกิริยาก็เป็นแบบไร้ออกซิเจน

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีหน้าที่ 2 ประการคือ

1) บำบัดสลัดจ์หรือสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนอินทรีย์ (อาจเป็นจุลินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใดๆก็ได้) โดยใช้ทำลายสารอินทรีย์ในตะกอนสลัดจ์ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2) การบำบัดน้ำเสีย กระบวนการบำบัดน้ำเสียมักเป็นกระบวนการขั้นต้นที่ใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลงก่อนส่งต่อไปให้กระบวนการแอโรบิคทำการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือ วิธีการนี้จะช่วยประหยัดทั้งพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้มาก

กระบวนการไร้ออกซิเจนมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแตกต่างจากกระบวนการแบบใช้ออกซิเจนอย่างเด่นชัดหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น

- กระบวนการไร้ออกซิเจนที่ได้ก๊าซมีเทนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา
- มีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำมาก
- ไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือต่ำมากได้
- มีเสถียรภาพต่ำ
- ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ

2.2.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยไร้ออกซิเจน

ภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ สารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็กจะถูกขนส่งผ่านเข้าไปในเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียได้เลย ส่วนสารประกอบที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะต้องถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ให้มีขนาดเล็กจนสามารถถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลล์ได้ เมื่อสารอินทรีย์อยู่ในเซลล์แล้วจะถูกออกซิไดส์หลายครั้ง จนในที่สุดกลายเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ จนกระทั่งได้ผลสุดท้ายมีหลายขั้นตอน ลำดับขั้นตอนของปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

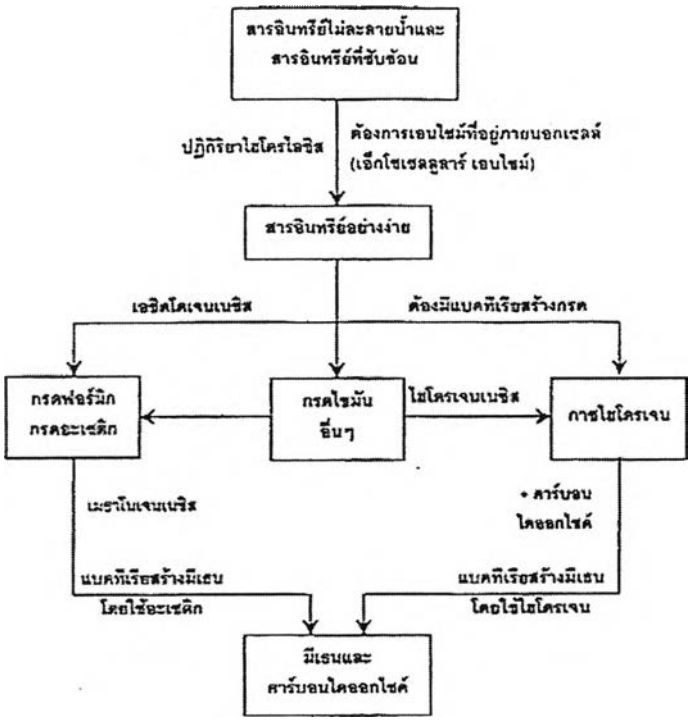
ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ลดขนาดของสารอินทรีย์เพื่อให้สามารถนำเข้าไปในเซลล์ได้ เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล เป็นต้น ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ (extracellura enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

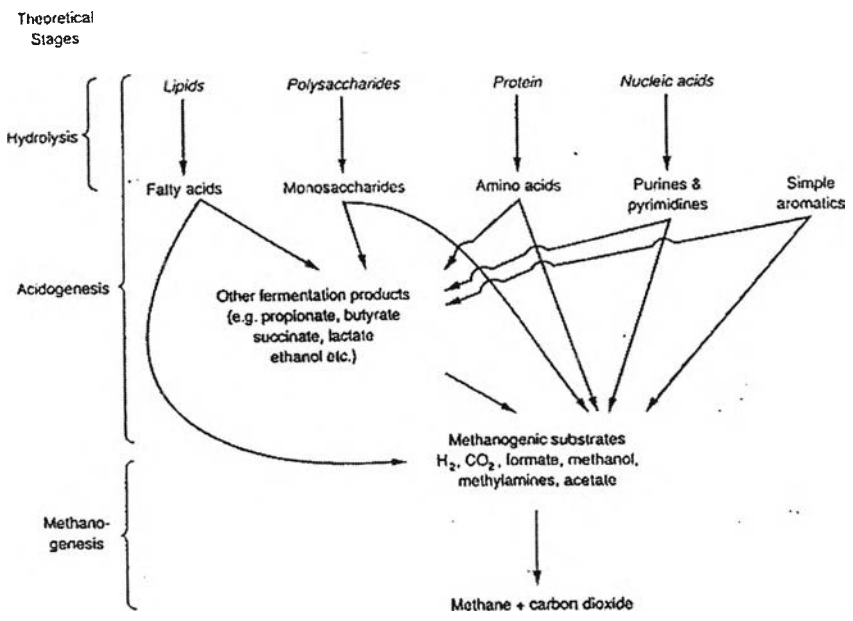
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

โมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของแบคทีเรีย โดยผ่านกระบวนการเฟอร์เมนเตชั่น (fermentation) ซึ่งผลสุดท้ายจะมีทั้งสารที่อยู่ในรูปรีดิวส์และรูปออกซิไดส์ ผลิตผลที่เป็นรูปออกซิไดส์ส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอินทรีย์ระเหย (volatile acids) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ปฏิกิริยาในการสร้างกรดอินทรีย์เหล่านี้เรียกว่าเอซิดโดเจนนิซีส (Acidogenesis) และแบคทีเรียที่รับผิดชอบเรียกว่าแบคทีเรียสร้างกรด ผลิตผลที่เป็นรูปรีดิวส์เป็นสารอินทรีย์หลายประเภทที่มีปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของถังปฏิกรณ์ เช่น

- แบคทีเรียสร้างกรดบางชนิดสามารถใช้อิออนของไฮโดรเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนแทนสารอินทรีย์ ทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา ในกรณีเช่นนี้จะไม่มีผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก
- แบคทีเรียบางตัวสามารถใช้กรดอินทรีย์ขนาดใหญ่หรือสารอินทรีย์อื่นในการสร้างกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยานี้สามารถสร้างไฮโดรเจนได้จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่เรียกว่า ไฮโดรจีโนเจนนีซีส (hydrogenogenesis) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ได้ แต่ตัวที่สร้างกรดได้อาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจน เพราะฉะนั้นแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนจึงเป็นแบคทีเรียที่สร้างกรด แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาจเรียกรวมได้ว่าเป็นแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน (non-methanogenic bacteria) แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด (obligate anaerobes)



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2536)



รูปที่ 2.3 แสดงวิถีการเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนของไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต (Metcalf and Eddy, 1991)

พบว่าไฮโดรเจนถูกใช้ในการรีดิวส์คาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นมีเทน ดังนั้นการอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียที่สร้างและไม่สร้างมีเทนจึงให้ประโยชน์ร่วมกัน แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนมอบกรดอะซิติกและสารอินทรีย์อย่างง่ายให้แก่แบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งในการสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปในเซลล์ เพื่อใช้ไปเป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย กระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลาย สารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นกับปัจจัย 2 ประการ คือ

- ชนิดของสับสเตรท
- ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

ตัวอย่างเช่น น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผ่านวิถี Embden-Meyerhof pathway (EMP) หรือ Glycolysis ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนและผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการไร้อากาศ (Flechter, 1990)

Culture Condition	Substrate	Hydrogen	Significance of Hydrogen Present
Rumen: dialysis sac	Rumen fluid, H_2	10^{-4} M	Normal methanogenesis
Methanobacterium omelianskii	Ethanol media	0.5 atm	Ethanol degradation inhibited
Sewage digester sludge	Glucose pulses 4.4 g/L	0.01 atm	Propionic acid accumulation to 0.3 g/L, pH drop to 6.6, 3 days to acid conversion and pH recovery
Sewage digester sludge	Glucose pulses 8.8 g/L	0.02 atm	Propionate acid accumulation to 1.2 g/L, pH drop to 6.1, 5 days to pH recovery
Sewage digester sludge	Glucose pulses 13.3 g/L	0.50 atm	Butyric acid accumulation to 1.8 g/L, pH drop to 5.0, no recovery
Sewage digester	Acetic and propionic acid	not reported	Propionate to acetate degradation inhibited under hydrogen atmosphere
Clostridium cellobioparum pure culture	Glucose rumen fluid broth	0.3 atm	H_2 production reduced 50% accumulation butyrate, ethanol, lactate
Sewage digester sludge	Sludge, acetic acid	10^{-4} + 0.015 atm	Linear increase in propionic acid
Sewage digester sludge	Sludge, propionic acid, ethanol	0.005 atm 0.07 atm	Propionate degradation inhibited, ethanol degradation inhibited
Sewage digester sludge	Wastewater sludge	0.18 atm	Propionic acid degradation inhibited
Thermoanaerobium brockii	Glucose	0.5 atm	Accumulation of lactate, ethanol H_2 production inhibited
Sewage digester sludge	Sludge	1.2 μM	Normal operation
Sewage digester sludge	Molasses and yeast	2×10^{-4} 1.5×10^{-3}	Organic shock was caused H_2 increase followed by propionic acid accumulation
Cattle manure, batch digester	Cattle manure	addition of 70:30 H_2:CO_2	Propionic acid accumulation
Propionic acid enrichment	Propionic acid	6.5×10^{-3} 4.3×10^{-6}	Normal operation at 8.2 day HRT Normal operation at 14.5 days HRT

สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ

กลูโคสจะถูกแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนดูดซึมเข้าไปย่อยสลายภายในเซลล์ภายใต้กระบวนการทางชีวเคมี แบบ EMP (Embden-Meyerhof Pathway) กลูโคสจะถูกออกซิไดส์เป็นกรดไพรูวิก ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ NAD^+ + 2\ ADP + 2P \longrightarrow 2CH_3COCOOH + 2\ NADH + ATP \quad (2.1)$$

โคเอนไซม์ NAD^+ จะถูกใช้เป็นตัวนำอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH และปลดปล่อย H^+ กลายเป็น NAD^+ กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ดังนี้

$$2\ NADH \longrightarrow 2\ NAD^+ + H_2 \quad (2.2)$$

ถ้าไฮโดรเจนที่อยู่น้ำมีความดันพาร์เชียลต่ำจะทำให้สมการ (2) สามารถเกิดจากซ้ายไปขวาได้เอง และกรดไพรูวิกจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นอะซิทิลโคเอ (CH_3CoA) ดังนี้

$$2CH_3COCOOH + 2\ NAD^+ \longrightarrow 2\ CH_3CoA + 2\ CO_2 + 2\ NADH \quad (2.3)$$

อะซิทิลโคเอจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกพร้อมกับการสร้าง ATP ดังนี้

$$2\ CH_3CoA + 2\ ADP + 2P \longrightarrow CH_3COOH + 2\ ATP \quad (2.4)$$

เมื่อรวมสมการ (1) (3) และ (4) เข้าด้วย จะได้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O + 4\ ADP + 4P \longrightarrow 2\ CH_3COOH + 2\ CO_2 + 4\ H_2 + 4\ ATP \quad (2.5)$$

ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำมากเท่านั้น และเมื่อกระบวนการไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ผลิตมีเทนโดยแบคทีเรีย H_2 utilizer ซึ่งเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนชนิดหนึ่ง เป็นผลให้ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนมีค่าต่ำเสมอ

$$4H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3\ H_2O \quad (2.6)$$

สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง

ถ้าหากไม่มี H_2 utilizer อาศัยอยู่ในถังย่อยไร้ออกซิเจน ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีการสะสมตัวจนกระทั่งความดันพาร์เชียลสูง ทำให้การปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ และวิธีการที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้คือการเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้กลายเป็นกรดโพรพิโอนิกสามารถทำให้ $NADH^+$ ปลดปล่อย H^+ ได้ดังนี้

$$CH_3COCOOH + 2NADH + ADP+P \dashrightarrow CH_3CH_2COOH+2NAD+ ATP+H_2O \quad (2.7)$$

และจากกลูโคส 1 โมล สามารถผลิตกรดไพรูวิกได้ 2 โมล ดังนั้นจะเหลือกรดไพรูวิกอีก 1 โมล ซึ่งจะถูกย่อยสลายเป็น acetyl CoA ไปตามปกติดังนี้

$$CH_3COCOOH + NAD^+ \dashrightarrow CH_3CoA + CO_2 + NADH \quad (2.8)$$

และหลังจากนี้ ถ้าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ การปลดปล่อย H^+ จาก NADH ก็สามารถดำเนินต่อไปได้ แต่ถ้าความดันพาร์เชียลมีค่าสูง การปลดปล่อย H^+ จะต้องเกิดขึ้นควบคู่กับการเปลี่ยน acetyl CoA ให้เป็นกรดอะซิติก ดังนี้

$$CH_3CoA + NADH \dashrightarrow CH_3COOH + H_2 + NAD^+ \quad (2.9)$$

เมื่อรวมสมการ (7) (8) และ (9) เข้าด้วยกัน จะได้สมการดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 3ADP + 3P \dashrightarrow CH_3COOH + CH_3CH_2COOH + CO_2+ H_2+ 3ATP \quad (2.10)$$

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (acetogenesis)

แบคทีเรียอะซิโตเจนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตท) เป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง เนื่องจากการผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสับสเตรทเฉพาะเจาะจงมากได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลลามีน (methylamine) แบคทีเรียอะซิโตเจนิก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และ

ไฮโดรเจน ภายใต้ภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริกและกรดโพรพิโอนิก ตามลำดับ

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad (2.11)$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + H_2 \quad (2.12)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้น เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนที่มีความดันพาร์เชียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนที่มีความดันพาร์เชียลสูง

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (methanagenesis)

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนเจริญเติบโตเกิดได้ช้ามาก และยังเป็นเซลล์ที่จำเพาะต่อชนิดอาหารมากและบอบบาง เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยหรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่ภายนอกช่วงพีเอชระหว่าง 6.8-7.2 จะพบว่าสับสเตรทที่แบคทีเรียทุกตัวสามารถใช้ได้มีเพียงไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอร์มิกและมีเพียงตัวเดียวที่ใช้กรดอะซิติกและเมทานอลได้ แบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์หลายชนิดและสารอินทรีย์อื่นๆด้วย แต่แบคทีเรียที่สร้างมีเทนต้องการสารอินทรีย์บางชนิดอย่างเจาะจง กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้ ทำให้ต้องมีสารอีกจำนวนมากที่ตกค้างอยู่ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ระบบไร้ออกซิเจนมักไม่สามารถลดซีโอดีของน้ำเสียให้เหลือต่ำเท่ากับกรณีของระบบที่ใช้ออกซิเจน

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนอาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (hydrogenotrophic methanogen หรือ hydrogen utilizer) กล่าวคือ ได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจำนวนมากจากไฮโดรเจน แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสับสเตรทเพียงอย่างเดียวได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมากจากว่ากรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + 32.4 \text{ kcal} \quad (2.13)$$

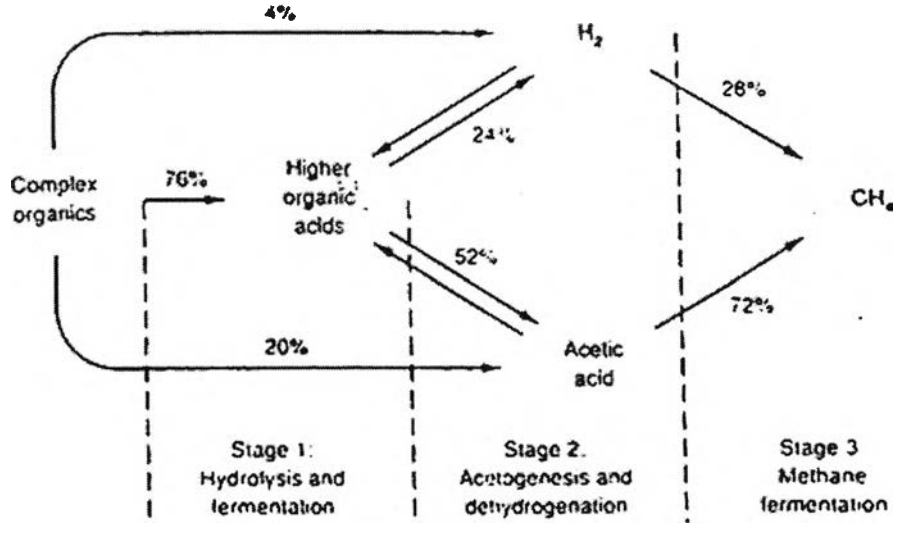
- แบคทีเรียสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetolastic methanogen) พบว่ามีเทนส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของกรดอะซิติกดังนี้

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 + 6.71 \text{ kcal} \qquad (2.14)$$

แต่อย่างไรก็ดียังมีข้อสงสัยว่าปฏิกิริยา (2.14) นี้ จะสามารถให้พลังงานพอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลล์หรือไม่ (ทั้งนี้เพราะตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ อาจพิสูจน์ได้ว่าสมการ (2.14) ได้พลังงานไม่เพียงพอในการดำรงชีวิตของเซลล์) การเปลี่ยนอะซิเตทให้เป็นมีเทนอาจเกิดขึ้นได้ด้วยปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานดังนี้

$$CH_3COOH + 4H_2 \longrightarrow 2CH_4 + 2H_2O + 39.01 \text{ kcal} \qquad (2.15)$$

ในปฏิกิริยาอันนี้กรดอะซิติกเป็นสารตัวสุดท้ายในการรับอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจน พลังงานที่ได้สูงกว่าที่ได้จากสมการ (2.14) มาก และเชื่อว่าเพียงพอสำหรับการดำรงชีวิตของเซลล์



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนย้ายของพลังงานในกระบวนการไร้อากาศ (Metcalf and Eddy, 1991)

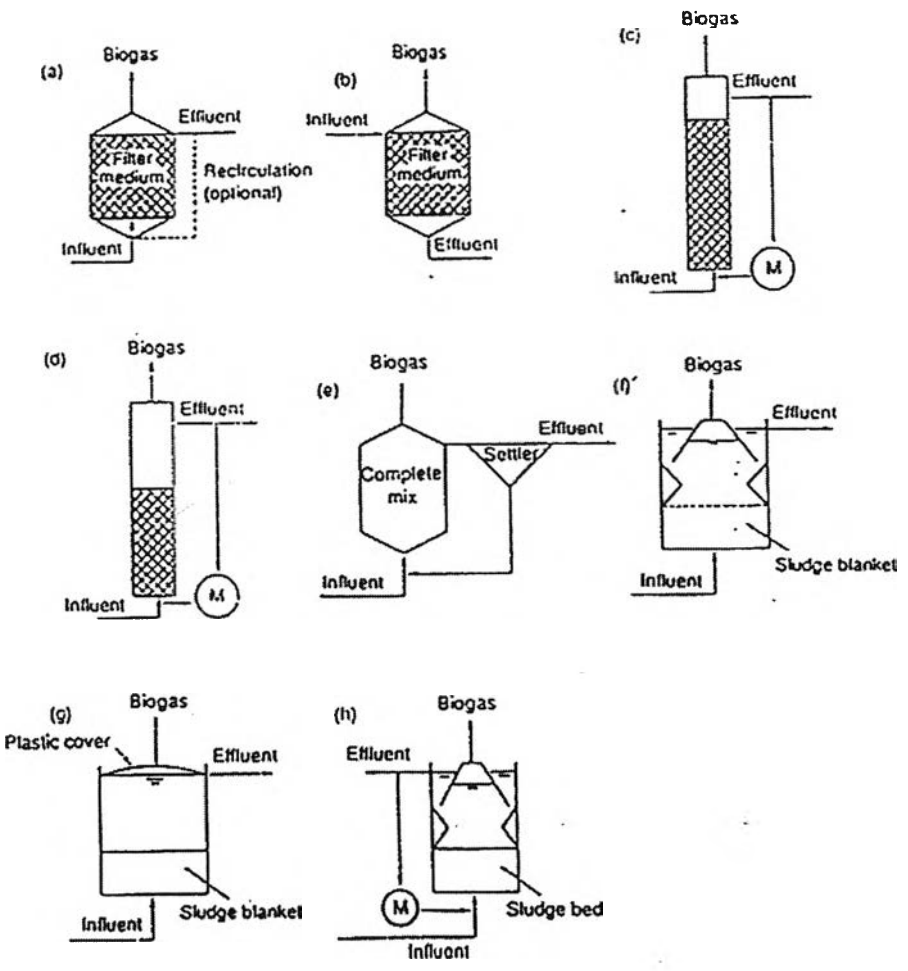
2.3 ระบบหมักก๊าซชีวภาพแบบยูเอเอสบี (UASB)

2.3.1 การทำงานของระบบยูเอเอสบี

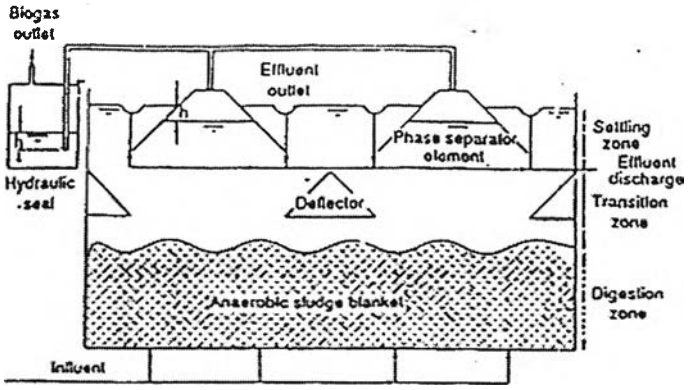
ลักษณะทั่วไปของถังยูเอเอสบี ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือทรงกระบอก ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ได้แก่

1) ส่วนที่เป็นถังหมักพร้อมกับระบบป้อนน้ำเสีย (Feed inlet system) ที่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์

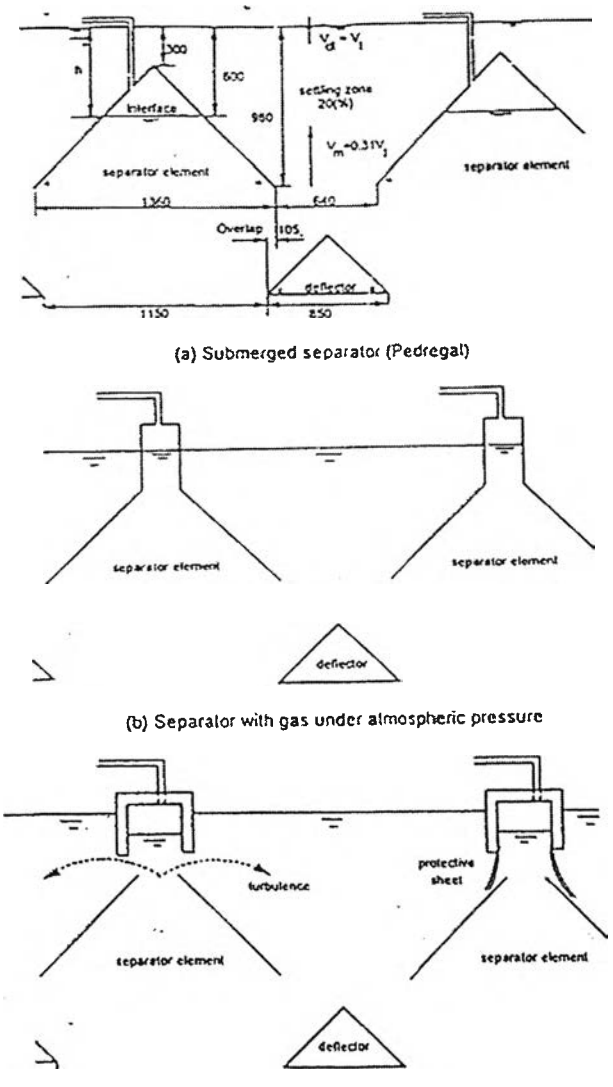
2) ถังตกตะกอนที่อยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ (GSS) ประกอบด้วยแผ่นกั้นเอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศา โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำหน้าที่แยกของเหลว ก๊าซ และตะกอนจุลินทรีย์ และยังทำหน้าที่ป้องกันการหลุดออกมากจากถังปฏิกรณ์ของตะกอนจุลินทรีย์ GSS ที่ใช้ในระบบยูเอเอสบี ที่บำบัดน้ำเสียชุมชนดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 แสดงระบบแบบไร้อากาศที่รับภาระบรรทุกสูง (high rate) ประเภทต่างๆ รวมทั้งระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ (Van Haandel and Lettinga, 1994)



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี (Van Haandel and Lettinga, 1994)



รูปที่ 2.7 แสดงรายละเอียดของ GSS ที่ใช้ในระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศต่าง ๆ (Van Haandel and Lettinga, 1994)

การทำงานของระบบยูเอเอสบี จะต้องทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ถังยูเอเอสบีก่อน และรักษาสภาพแวดล้อมในถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสมต่อการเกิดชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge bed) ซึ่งจะมีความเข้มข้นประมาณ 40-100 kg VSS/m^3 ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นจะเกิดการรวมตัวกันโดยกลุ่มของแบคทีเรียจนกระทั่งมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) ซึ่งมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดี ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียที่ถูกบำบัดและเชื้อจุลชีพที่เอามาเลี้ยงเพื่อเริ่มต้น (Start up) ระบบ

น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ผ่านระบบป้อนน้ำเสียระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านและเกิดการสัมผัสกับชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ก็จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ ทำให้เกิดเซลล์ของแบคทีเรีย และก๊าซชีวภาพต่างๆ โดยที่ก๊าซเหล่านี้จะเกาะติดอยู่กับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากความเร็วของน้ำเสียที่ไหลขึ้นประกอบกับก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอยและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ และเมื่อน้ำเสียไหลขึ้นไปยังส่วนบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ GSS น้ำเสียจะเกิดการปะทะกับแผ่นกั้นและก๊าซที่เกาะมากับกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออกโดยไหลไปยังส่วนบนออกไปตามท่อไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ น้ำเสียจะถูกแยกออกจากตะกอนจุลินทรีย์และไหลล้นออกไปนอกถังปฏิกรณ์ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์จะถูกดักและตกลงกลับไปยังชั้นของตะกอนด้านล่าง การที่ระบบประสบความล้มเหลวในการบำบัดสาเหตุส่วนใหญ่เนื่องมากจากการที่ไม่สามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นได้มากเพียงพอ และเกิดการล้างออก (Wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ออกไปพร้อมกับน้ำทิ้ง

2.3.2 ข้อดี และข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ข้อดีของระบบยูเอเอสบี ได้แก่

1) สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไร้อากาศแบบอื่น

2) ใช้พลังงานเดินระบบต่ำเพราะไม่มีการเติมอากาศและไม่ใช้เครื่องจักรกล

3) ปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดจากระบบน้อยกว่าแบบเติมอากาศในระบบใช้ออกซิเจน สารอินทรีย์จะเปลี่ยนไปเป็นเซลล์จุลินทรีย์ถึง 50% ในขณะที่ระบบไร้อากาศจะเปลี่ยนไปเป็นเซลล์จุลชีพเพียง 10% และสลัดจ์ยังมีความคงตัวสูง สามารถทำ dewatering ได้ง่าย

4) ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบใช้ออกซิเจน

5) ก๊าซมีเทนที่ได้จากถังปฏิกรณ์สามารถเอาไปใช้เป็นพลังงานต่อได้

6) สามารถป้องกันมิให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบไร้อากาศแบบอื่น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7) มีความเหมาะสมที่จะใช้ในระบบบำบัดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และในพื้นที่ชุมชนนอกเขตเมือง

8) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่มีปัญหา และการเริ่มต้นระบบใหม่สามารถกระทำได้ง่าย ระบบฟื้นตัวได้เร็ว จึงเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู

9) สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษบางอย่างได้ เช่น halogenated solvents

ข้อเสียของระบบยูเอเอสบี ได้แก่

1) ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบ (start up) นานมาก และต้องเลี้ยงตะกอนให้จับตัวกันเป็นเม็ดระบบจึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี

2) ต้องควบคุมปริมาณของตะกอนที่มีอยู่ในระบบให้เหมาะสม และเกิดการล้างออก (wash out) น้อยที่สุด

3) ควบคุมอัตราการผลิตก๊าซในถังปฏิกรณ์ให้เพียงพอต่อการผสมในชั้นสลัดจ์

4) แบคทีเรียในระบบมีความสามารถในการเจริญเติบโตในช่วงพีเอชที่ค่อนข้างแคบประมาณ 6.5-7.2

5) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ

6) ต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างมาก

7) ระบบไร้อากาศไม่สามารถเป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้เนื่องจากยังคงมีสารตัวกลาง (intermediate) ต่างๆ เหลืออยู่ ทำให้น้ำทิ้งมักมีซีโอดีสูง

ข้อดี และข้อเสียของระบบยูเอเอสบีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบระหว่างระบบยูเอเอสบีกับระบบหมักแบบประสิทธิภาพสูงอื่น ๆ (สุเมธ ชวเดช, 2530)

	Anaerobic filter	Anaerobic contact	Anaerobic fluid bed	UASB
Investment	สูง	ปานกลาง	สูงมาก	ต่ำ
Operation cost	ต่ำ	ปานกลาง	สูงมาก	ต่ำ
Control	ง่ายมาก	ปานกลาง	ยาก	ปานกลาง
Loading	สูง	สูง	สูงมาก	สูงมาก
Shock load	ดี	ดี	ดีมาก	ดีมาก
Digester size	เล็ก	เล็ก	เล็กมาก	เล็กน้อย
Start-up	ง่าย	ปานกลาง	ยาก	ยาก

2.3.3 ประเภทของ Granular Sludge ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี (สมพงษ์ นิลประยูร และเสนีย์ กาญจนวงศ์, 2536)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าแบคทีเรียในถังหมักยูเอเอสบีแบ่งเป็น 2 ชั้น คือชั้นบนแบคทีเรียมีลักษณะเป็นตะกอนเบา ส่วนชั้นล่างมีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งเกิดจากแบคทีเรียเกาะติดกันแน่น จึงมีความหนาแน่นของจำนวนเซลแบคทีเรียต่อปริมาตรในชั้นล่างนี้สูงกว่าในชั้นบนที่มีลักษณะเป็นตะกอนเบามาก ดังนั้นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จึงถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นมีเทนในชั้นของตะกอนเม็ดเป็นส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพของระบบหมักแบบยูเอเอสบีจึงขึ้นกับปริมาณและลักษณะสมบัติของแบคทีเรียชนิดเม็ด

ลักษณะของ Granular Sludge ที่เกิดขึ้นในระบบยูเอเอสบี ขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ (Seed sludge) ส่วนประกอบของน้ำเสีย ตลอดจนการเริ่มต้นขบวนการแบบไร้อากาศ และสิ่งแวดล้อมที่เริ่มต้น Granular Sludge อาจมีหลายชนิดดังนี้

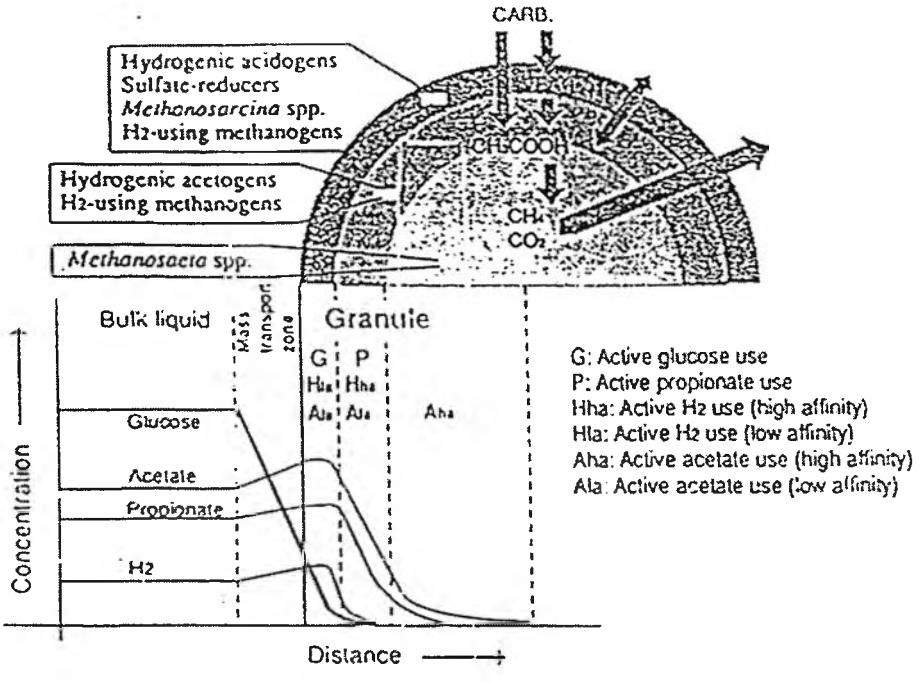
1) sarcina granules เป็นเม็ดแบคทีเรียที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วย methanosarcina ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อระบบหมักรับปริมาณสารอินทรีย์สูงมากไป (over loading) โดยทำให้เกิดสภาพการสะสมของกรดอินทรีย์มากกว่า 1,000 มก./ล. ที่ pH น้อยกว่า 6 sarcina granules นี้พบว่ามีความสามารถในการผลิตมีเทน (methane production activity) ต่ำมาก

2) rod-type granules เม็ดแบคทีเรียประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นท่อนสั้นๆเป็นส่วนใหญ่ โดยเม็ดแบคทีเรียนี้มีขนาดประมาณ 3 มม. และมี VS สูงถึง 90% ซึ่งตรวจพบในถังหมักยูเอเอสบีที่รับน้ำเสียบางประเภท เช่น sugar beet wastewater และ potato-processing waste เป็นต้น แบคทีเรียนี้จัดเป็นพวก methanothrix soehgenii

3) filamentous granules เป็นเม็ดแบคทีเรียซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีเส้นยาว (filamentous bacteria) เป็นส่วนใหญ่ เม็ดแบคทีเรียนี้มีขนาดใหญ่ถึง 5 มม. ภายในมักเป็นพวก inert carrier material ดังนั้นจึงมีค่า VS ต่ำกว่าเม็ดแบคทีเรียสองพวกแรก ในระบบหมักยูเอเอสบีที่มีเม็ดแบคทีเรียประเภทเส้นใยยาวนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเป็นสภาพการที่ถูกกำหนดความต้องการในการควบคุมระบบหมัก กล่าวคือสภาพถังหมักจะไม่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์ในถังหมักควรต่ำกว่า 1,000 มก./ล.

4) spiky granules ในกรณีที่น้ำเสียมีสารแคลเซียมสูงเม็ดแบคทีเรียในระบบยูเอเอสบีจะประกอบด้วยผลึกของ $CaCO_3$ อยู่สูงถึง 60% โดยมีลักษณะเป็นหนามแหลม เม็ดแบคทีเรียนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มม. และหนา 0.5 มม. มี settling velocity สูงถึง 2-90 ม./ชม. แบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นพวกเส้นใยยาวเม็ดแบคทีเรียประเภทนี้มี activity ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากประกอบด้วย $CaCO_3$ ที่จะพอกบนผิวเม็ดแบคทีเรีย

โครงสร้างของ Granular Sludge ประกอบด้วย Methanotrix Aggregates Rod เป็นแกนกลาง และล้อมรอบด้วย Methanotrix ที่เป็นสายล้อมรอบดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของเม็ดจุลชีพในระบบยูเอเอสบี บำบัดน้ำเสียกลูโคส (Guiot และคณะ, 1992)

2.3.4 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดจุลชีพ (Granules)

Guiot และคณะ (1992) กล่าวว่าความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ของแบคทีเรียที่สามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดจุลชีพที่สามารถตกตะกอนได้ดี เม็ดจุลชีพที่เกิดขึ้นมีข้อดีดังนี้ คือ

- มีความหนาแน่นสูง
- เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลาง (Media) จึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถังปฏิกรณ์
- เม็ดจุลชีพมีอัตราส่วนของแบคทีเรียต่อปริมาตรที่สูงมาก

การศึกษาโครงสร้างของเม็ดจุลชีพในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscopic) พบว่ามีโครงสร้างภายในแบ่งออกเป็น 3 ชั้น เช่น เม็ดจุลชีพที่พบในการทดลองซึ่งใช้น้ำตาลซูโครส พบกลุ่มแบคทีเรียแบ่งเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนี้

ชั้นนอก ซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียหลายกลุ่ม ได้แก่ Hydrogenic acidogens Sulfate reducers Methanosarcina และ H_2-utilizing methanogens

ชั้นกลาง ได้แก่ Hydrogenics acetogens และ H_2-utilizing methanogens เช่น Methanosarcina Methanococcales และ Maethanospirillum

ชั้นใน เป็นแบคทีเรียประเภท Aceticlastic ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta

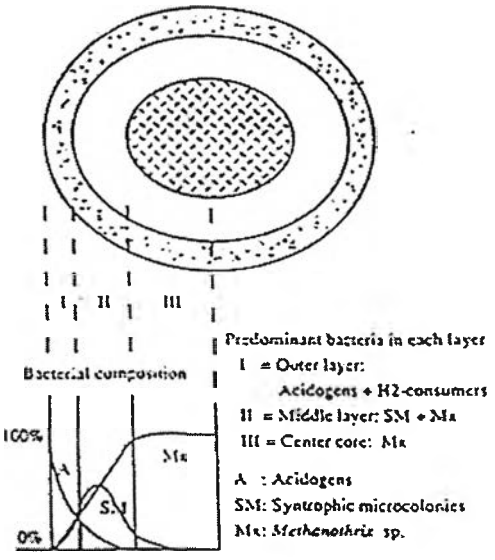
แบคทีเรียกลุ่ม H_2-utilizing methanogens ในชั้นกลางและชั้นนอกมีความแตกต่างกันคือ กลุ่มแบคทีเรียชั้นนอกมีความชอบที่จะใช้สับสเตรทที่ต่ำกว่า (low affinity หรือมีค่า Ks สูง) กลุ่มแบคทีเรียชั้นกลาง และแบคทีเรียกลุ่ม Aceticlastic ในชั้นกลาง การเกิดเม็ดจุลชีพเป็นโครงสร้างในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียแต่ละชนิด โดยเฉพาะในแกนกลางของเม็ดจุลชีพซึ่งเป็น Aceticlastic methanogens (ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta) เป็นส่วนสำคัญในการผลิตมีเทนโดยอาศัยสับสเตรท ได้แก่ อะซิเตท ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มชั้นนอกและชั้นกลาง โดยทั้งนี้ Methanosaeta เป็นแบคทีเรียที่มีค่า affinity สูงมากที่สุด (Ks ต่ำมากที่สุด) ในกลุ่มแบคทีเรีย Aceticlastic methanogens ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของ Methanosaeta ในสภาวะที่ข้อจำกัดของการแพร่กระจายอะซิเตทมายังแกนกลางของเม็ดจุลชีพ

อย่างไรก็ตามมีรายงานวาไม่พบโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นของแบคทีเรียในเม็ดจุลชีพที่บำบัดน้ำเสียประเภทโพรพิโอเนท เอทานอล และน้ำเสียประเภทที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (non-carbohydrate) โดยเฉพาะน้ำเสียประเภทโพรพิโอเนท พบแบคทีเรียกลุ่ม propionate oxidizing acetogens กระจายอยู่ทั่วเม็ดจุลชีพ (Fang และคณะ, 1994)

โครงสร้างและขนาดของชั้นแบคทีเรียในแต่ละชั้นขึ้นกับอัตราการย่อยสลายสับสเตรทและการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดจุลชีพ ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ผิวนอกสุดของเม็ดจุลชีพพบว่ากลุ่ม acidogens จะมีปริมาณมาก ทั้งนี้เพราะนอกเหนือไปจากความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่าสูงบริเวณรอบนอก (bulk liquid) แล้ว ยังเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ acidogenesis ที่มีค่าสูงกว่า acetogenesis และ methanogenesis อะซิเตทที่ถูกผลิตจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลางและชั้นในของเม็ดจุลชีพต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ในกรณีที่เป็นน้ำเสียประเภทโปรตีนหรือกรดอะมิโน เช่นกลูตาเมต ขั้นตอน acidogenesis จะเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (rate limiting step) ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการย่อยสลายและการแพร่กระจายที่ช้าของกลูตาเมต ทำให้มีการแพร่กระจายของ

สารอาหารอย่างทั่วถึงทั้งเม็ดจุลชีพ ซึ่งส่งผลให้แบคทีเรียมีลักษณะเหมือนกันทั่วทั้งเม็ดจุลชีพ และไม่เกิดโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นของกลุ่มแบคทีเรีย (Fang และคณะ, 1994)



. Proposed layered structure and bacterial composition for the granules treating soluble carbohydrates.

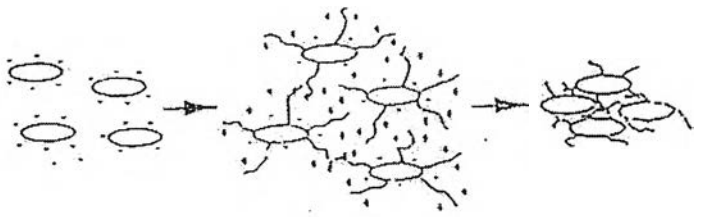
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต (Fang และคณะ, 1994)

ความสำคัญของ Extracellular Polymers (ECP) ต่อการเกิดเม็ดจุลชีพ (Schmidt และ Ahring, 1995)

Extracellular Polymers (ECP) เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไปในธรรมชาติและเป็นพื้นฐานสำคัญของโครงสร้างเม็ดจุลชีพ ECP ของเซลล์แบคทีเรียเป็นสารที่มีโครงสร้างที่มีส่วนประกอบหลักเป็น polysaccharide สำหรับเซลล์แกรมบวก ECP เป็นสารที่เกิดได้จากหลายทาง เช่น การสลายตัวของเซลล์ หรือสารอินทรีย์ที่ถูกขับทิ้งออกมาจากเซลล์ ECP ประกอบไปด้วยโพลิเมอร์ของ saccharide โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก โดยหน้าที่ของ ECP จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเซลล์แบคทีเรีย ECP มีความสามารถในการดักจับสารอาหารละลาย (soluble nutrients) และยังเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะกับเซลล์อื่นด้วย

มีรายงานวิจัยหลายรายงานว่าแบคทีเรียที่อยู่ภายในเม็ดจุลชีพถูกล้อมรอบด้วย ECP และเป็นที่ยอมรับว่าในกระบวนการรวมตัวกันเป็นเม็ดจุลชีพจะมี ECP เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ECP

ที่พบในเม็ดจุลชีพมักประกอบด้วย โปรตีน และ polysaccharides เป็นส่วนใหญ่ โดยมีอัตราส่วนโปรตีนต่อ polysaccharides เท่ากับ 2:1 ถึง 6:1 และยังมีส่วนประกอบของไขมันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.02-0.05% VSS สารที่เป็นส่วนประกอบใน ECP จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของสลัดจ์ โดยทั่วไปแบคทีเรียที่กระจายตัวในน้ำเสีย มักจะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบและเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างเซลล์ แต่ ECP ที่ห่อหุ้มรอบผิวเซลล์จะส่งผลให้เซลล์เหล่านั้นเกิดการรวมตัวเนื่องจากมีส่วนที่เป็นประจุบวกและเกิดการดูดติดกันดังแสดงในรูปที่ 2.10 อย่างไรก็ตาม ปริมาณ ECP ที่มากเกินไปสามารถส่งผลต่อการเกิดเม็ดจุลชีพเนื่องจากเกิดการผลักกันของประจุบวก



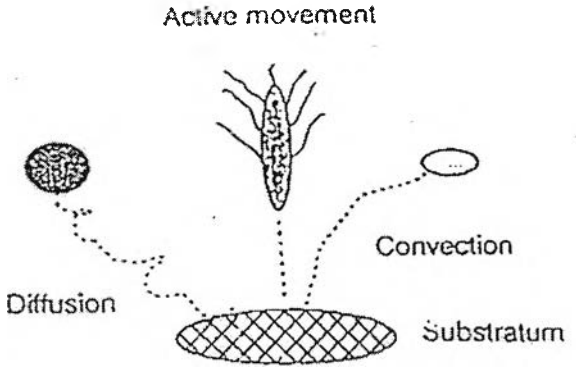
รูปที่ 2.10 แสดงบทบาทของประจุไฟฟ้าและ ECP ที่ส่งผลต่อการรวมตัวของแบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

ปริมาณ ECP ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่เม็ดจุลชีพเจริญเติบโต พบว่าความเข้มข้น ECP ในช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิค มีค่าต่ำกว่าในช่วง เมโซฟิลิค และยังขึ้นกับประเภทของน้ำเสียด้วย มีรายงานว่าส่วนประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งสกัดจากเม็ดจุลชีพมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมธาตุเหล็กและ yeast extract ลงไปในน้ำเสีย และเกิดผลตรงกันข้ามเมื่อไม่ได้ทำการเติมเหล็ก การเพิ่มอัตราส่วน C/N จะทำให้มีปริมาณ extracellular polysaccharide ซึ่งทำให้ความสามารถในการยึดเกาะของเซลล์เพิ่มขึ้น และยังมีรายงานว่าปริมาณของโปรตีนและ polysaccharide ใน ECP ที่ลดลง ถูกพบในระบบยูเอเอสบีที่เปลี่ยนแปลงจากการบำบัดน้ำเสียประเภทน้ำตาลมาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมอะซิเตท โพรพิโอเนท และบิวทิเรท และยังพบปริมาณไขมันที่สูงขึ้นในเม็ดจุลชีพอีกด้วย

ปัจจุบันยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า ECP เป็นผลผลิตที่เกิดจากแบคทีเรียจำเพาะกลุ่มหนึ่งหรือแบคทีเรียทุกชนิดในสลัดจ์ แต่อย่างไรก็ตาม ผลผลิตซึ่งเป็น ECP โดยเฉพาะ polysaccharide เป็นผลผลิตเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่ม methanogenic และ acetogenic น้อยมาก และแบคทีเรียกลุ่ม acidogenic เป็นกลุ่มที่มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อผลผลิต ECP ที่เกิดขึ้น

กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดจุลชีพสามารถอธิบายได้โดยขั้นตอนดังนี้ (Schmidt และ Ahring, 1995)

ขั้นตอนที่ 1 Transport การเคลื่อนไหวของเซลล์ด้วยวิธีการต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ไปจับตัวกับอนุภาคเฉื่อย หรือเซลล์แบคทีเรียอื่น กลายเป็นอนุภาคพื้นฐาน ด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การแพร่กระจาย การพัดพา หรือการเคลื่อนไหวของเซลล์โดย flagella

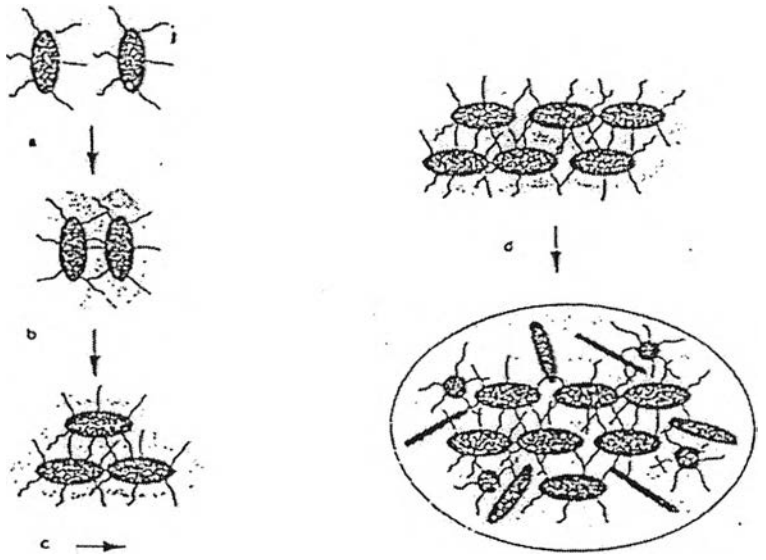


รูปที่ 2.11 แสดงกลไกการเคลื่อนไหวต่างๆ ที่มีผลต่อการรวมตัวของเซลล์แบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

ขั้นตอนที่ 2 Reversible adsorption การดูดติดของเซลล์แบคทีเรียกับ substratum ซึ่งอาจเป็นกลุ่มแบคทีเรียหรืออนุภาคของแข็งเฉื่อย โดยแรงทางฟิสิกส์-เคมี ซึ่งสามารถเกิดการแยกตัวหรือหลุดออกไปได้อีกครั้ง การดูดยึดเป็นผลมาจากแรงทางประจุไฟฟ้า (Ionic strength)

ขั้นตอนที่ 3 Irreversible adhesion ด้วยพันธะแข็งแรงของโพลิเมอร์ (ECP) การเกาะยึดของเซลล์เข้ากับ substratum ซึ่งเซลล์มีโอกาสที่จะหลุดออกจากเม็ดจุลชีพได้ยากมาก ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า ECP ถูกผลิตขึ้นมาก่อนหรือหลังการเกาะยึดของเซลล์ adhesion

ขั้นตอนที่ 4 Multiplication หรือการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ในชั้น ECP โดยเซลล์ที่แบ่งตัวใหม่ยังคงถูกกักอยู่ในชั้น ECP และเกิดการเพิ่มขนาดของเม็ดจุลชีพ และนอกจากนี้ยังเกิดจากการดักเซลล์ใหม่ที่อยู่ในน้ำเสียเข้ามาจับตัวในเม็ดจุลชีพ



รูปที่ 2.12 แสดงกลไกของการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลล์โดยอาศัย ECP จนกลายเป็นเม็ดจุลชีพ (Schmidt และ Ahring, 1995)

2.3.5 กระบวนการเกิดตะกอนเม็ด (Process of granulation)

ระบบยูเอเอสบีมีปริมาณแบคทีเรียซึ่งวัดในรูป MLSS หรือ MLVSS สูงกว่าระบบหมักอื่นๆ เนื่องจากระบบยูเอเอสบีมีตะกอนแบคทีเรียในลักษณะเป็นเม็ด ดังนั้นในการควบคุมระบบยูเอเอสบีให้มีประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นต้องสร้างเม็ดแบคทีเรียดังกล่าวในถังหมักให้ได้ มิฉะนั้นแล้วระบบยูเอเอสบีจะไม่สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง ในกรณีที่มีตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดอยู่แล้ว การเดินระบบยูเอเอสบีจะไม่ยุ่งยากมากนัก แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่สามารถหาแบคทีเรียชนิดเม็ดได้ ดังนั้นการเดินระบบหมักยูเอเอสบีจึงมักเริ่มต้นด้วยตะกอนแบคทีเรียที่ได้จากระบบหมักแบบอื่นๆ ซึ่งตะกอนแบคทีเรียเหล่านี้มักอยู่ในรูปตะกอนเบา โดยขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบคทีเรียจากตะกอนเบาเป็นตะกอนเม็ดแบ่งได้เป็น 3 ระยะดังนี้

1) wash-out stage เป็นช่วงแรกของกระบวนการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือการเริ่มต้นเดินระบบซึ่งจะต้องเริ่มที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำๆคือต่ำกว่า 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน หรือ sludge loading ต่ำกว่า 0.3 กก./กก.VSS วัน ในช่วงอัตราป้อนสารอินทรีย์ต่ำนี้จะเกิดกระบวนการสูญเสียของตะกอนแบคทีเรียขนาดเล็กซึ่งเบา โดยลอยออกมากับน้ำล้นตลอดเวลา (wash-out) เมื่ออัตราป้อนสูงขึ้นกว่าช่วงดังกล่าวจะยังคงเกิดกระบวนการ wash-out พร้อมกับมีการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในระบบ เนื่องจากมีปริมาณอาหารเข้าสู่ระบบสูงขึ้น

2) transition stage เป็นช่วงที่เริ่มเกิดแบคทีเรียชนิดเม็ด แต่ยังมีจำนวนน้อยและมีขนาดเล็ก อัตราป้อนสารอินทรีย์ในช่วง transition stage ขึ้นกับลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ โดยทั่วไปพบว่าอัตราป้อนสารอินทรีย์ประมาณ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน (ประมาณ 0.3-0.6 กก.ซีโอดี/กก.VSS วัน) ในช่วงนี้จะเกิดฟองก๊าซชีวภาพมาก จึงมักมาพาแบคทีเรียพวกตะกอนเบาออกจากระบบมาก ซึ่งจะเป็นผลดีทำให้แบคทีเรียที่สร้างตะกอนเม็ดมีโอกาสเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้น แต่สิ่งที่ควรระวังคือมิให้อัตราการสูญเสียปริมาณแบคทีเรียชนิดตะกอนเบาสูงกว่าอัตราการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียชนิดเม็ด มิฉะนั้นแล้วระบบจะล้มเหลวได้

3) progressive granulation stage เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดและปริมาณของแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังหมัก ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงที่อัตราป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น ในช่วงนี้ระบบจะมีความสามารถรับการเพิ่มของอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงและรวดเร็วขึ้นกว่าระยะอื่น

2.3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแต่ละชนิด จะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำเสียและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ภายในกระบวนการนั้นๆ สำหรับกระบวนการจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบต้องปราศจากสารพิษและต้องปรับสภาพของน้ำเสียให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในระบบ เช่น สภาพความเป็นกรดด่าง อาหารเสริม เป็นต้น ส่วนกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ภายในระบบ นอกจากจะรักษาสภาพสมดุลของจุลินทรีย์ที่สร้างกรดและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนแล้ว ยังต้องรักษาจำนวนจุลินทรีย์ในระบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ พารามิเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาคือความสามารถในการตกตะกอนของจุลินทรีย์ (sludge settle ability) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราป้อนสารอินทรีย์ (organic loading rate) ดังนั้นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ควบคุมการทำงานของกระบวนการชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้นคืออัตราป้อนสารอินทรีย์และอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด

1) อัตราป้อนสารอินทรีย์ เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ การตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์และการเกิดก๊าซในถังปฏิกิริยา น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบควรมีอัตราป้อนต่ำกว่าอัตราสูงสุดในการกำจัดสารอินทรีย์และตะกอนจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 5-18 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน แต่อาจสูงกว่าช่วงดังกล่าวได้ ขึ้นกับลักษณะของน้ำเสีย

2) อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด (hydraulic loading rate) อัตราไหลต่อพื้นที่หน้าตัดมีความสัมพันธ์กับการกวนในชั้นตะกอนล่าง จากการทดลองของกระบวนการ denitrification โดยใช้ถังยูเอเอสบีขนาดห้องปฏิบัติการและให้การกวนในถังปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยก๊าซที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยานั่นเอง พบว่าน้ำเสียจะไหลผ่านช่องว่างที่เกิดขึ้นจากรอยแตกของ

ตะกอนจุลินทรีย์ในชั้นตะกอนล่างซึ่งเป็นการไหลลัดวงจร (short circuit) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ลดลง สามารถแก้ไขได้โดยการกระจายน้ำเข้า (feed inlet distribution) ให้สม่ำเสมอตลอดพื้นที่ด้านล่างของถังปฏิกิริยา ถ้าระบบกระจายน้ำสามารถกระจายน้ำเสียได้ทั่วตลอดพื้นที่ก้นถังจะทำให้ระบบรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูง

3) สภาพการไหลของน้ำในถังหมัก (flow pattern) มีความสำคัญมากในการก่อให้เกิดการสร้างแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังหมัก กล่าวคือถ้าสภาพการไหลไม่เหมาะแล้วแบคทีเรียในถังจะไม่อยู่ในรูปเม็ดหรืออาจเกิดสภาพการยกตัวของตะกอนแบคทีเรียและลอยออกจากถังจนหมด ซึ่งในที่สุดถังหมักจะอยู่ในสภาพเสียสมดุล สภาพการไหลของน้ำในถังหมัก ควรมีข้อกำหนดดังนี้

อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด	> 0.25 – 0.4 ม./ชม. แต่ < 2 ม./ชม.
Biogas flux	> 0.15 – 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.

4) ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก (sludge hold-up) ปริมาณตะกอนแบคทีเรียยิ่งมีมากยิ่งส่งผลดีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ แต่สิ่งที่ควรระวังต้องไม่ให้ชั้นของตะกอนเม็ดและตะกอนเบาอยู่สูงถึง settler มิฉะนั้นแล้วแบคทีเรียจะหลุดลอยออกมากับน้ำที่ล้นออก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องมีการตรวจเช็คระดับของตะกอนในถังหมักอย่างสม่ำเสมอเพื่อกำหนดปริมาณตะกอนที่จะต้องนำออกจากถังหมัก

2.3.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

1) อุณหภูมิ ระบบยูเอเอสบีสามารถทำงานในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 2 ช่วงคือ

- ช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) ในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-60 ^{0}ซ
- ช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) ในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 ^{0}ซ

แม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) จะมีอัตราการย่อยสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) แต่มักจะให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) มากกว่าในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากพวกเทอร์โมฟิลิคจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิมากกว่า ดังนั้น การรักษาอุณหภูมิให้อย่างสม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้มีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3 ^{0}ซ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนอย่างมาก

2) พีเอช แบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanogens) มีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด โดยที่ขั้นตอนนี้จะเกิดได้ดีที่ช่วงพีเอช 6.5-8.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดสร้างกรด (Acidogens) ยังสามารถทำงานได้ดีที่พีเอช 6.0-

6.5 นอกจากนี้ค่าพีเอชยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน โดยที่ค่าพีเอชดังกล่าวจะส่งผลต่อรูปไอออนของสารต่างๆ เช่น volatile fatty acid , NH_3 และ H_2S ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน

3) ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่ทำงานได้ดีควรจะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในรูปของกรดอะซิติกประมาณ 200-400 มก./ล. อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของกรดมีความสำคัญมากกว่าปริมาณกรด โดยที่ระบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงกว่า 1,000 มก./ล. แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มอย่างรวดเร็วจะแสดงถึงการเสียสมดุลย์กับระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชะลอตัวของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ชนิดของกรดอินทรีย์ก็ถือว่ามีความสำคัญ เช่นกรดโพรพิโอนิกสูงกว่า 1,000 มก./ล. จะทำให้เกิดปัญหาทั้งความเป็นพิษของกรดชนิดนี้และระดับพีเอชที่ต่ำลง

4) ระดับสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต สภาพด่างบอกให้ทราบถึงกำลังบัพเฟอร์ (buffer capacity) ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ถ้ากำลังบัพเฟอร์ต่ำ ปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พีเอชลดลงได้อย่างรวดเร็วและมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทน ระดับสภาพด่างที่จะทำให้มีกำลังบัพเฟอร์ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงก็มีโอกาสที่จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ดังนั้นกำลังบัพเฟอร์ของระบบจะต้องเพิ่มขึ้น โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้อากาศควรมีสภาพด่างประมาณ 1,500-2,000 มก./ล. และนอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญคือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อระดับของสภาพด่างไบคาร์บอเนต (มก./ล. ของ $CaCO_3$) ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงเมื่ออัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าพีเอชของระบบกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว

5) โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential, ORP) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) โดยแสดงปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทั่วไปจะวัดค่าโออาร์พีได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรด และวัดค่าโออาร์พีเป็นลบเมื่อน้ำเสียอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจน โออาร์พีจะแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย ถ้าวัดค่าโออาร์พีมีค่าบวกมากๆ แสดงว่าสารละลายนี้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี สำหรับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อยหรือมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดีและมีค่าโออาร์พีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 300-500 มิลลิโวลท์

6) ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย (substrate) เกี่ยวข้องโดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบและประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิด

กันมีอัตราการย่อยสลายที่ช้าเร็วต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน

7) สารอาหารที่จำเป็น (Nutrient) การบำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนข้อดีประการหนึ่งคือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องการสารอาหารเสริมเช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสต่ำกว่าแบบใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน BOD:N:P = 100:1.1:0.2 หรือ COD:N:P = 350:5:1 นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง COD ต่อ N ยังมีผลต่อลักษณะเม็ดอีกด้วย โดยทำให้เม็ดมีลักษณะเป็นปุยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวสูงถึง 100 : 10

แบคทีเรียผลิตมีเทนยังต้องการธาตุอาหารบางอย่างในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ (trace element) มิฉะนั้นระบบอาจไม่ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้เช่น เหล็ก,โคบอลท์, นิกเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดี การเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียเป็นการลำบากเนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่างๆตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจทำได้โดยการเติม Yeast Extract

8) สารพิษ (Toxic) น้ำเสียที่จะนำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศจะต้องไม่มีสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ถ้าหากสารเหล่านี้มีปริมาณน้อยก็จะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ ได้แก่

- พิษของกรดไขมันระเหย กรดไขมันระเหยในปริมาณสูงในระบบจะส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชซึ่งลดค่าลงอยู่ในช่วงที่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์

- พิษของแอมโมเนีย แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ คือโปรตีนหรือยูเรีย โดยทั้งนี้ไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา โดยที่ NH_3 จะยับยั้งการทำงานและเป็นพิษมากกว่า NH_3^+

- พิษของซัลไฟด์ เกิดขึ้นได้เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณซัลไฟด์มากหรือเกิดการย่อยสลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือเกิดการย่อยโปรตีนซัลไฟด์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยทั้งนี้สารประกอบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำ ขึ้นกับอิออนบวกที่รวมอยู่ โดยถ้ารวมกับโลหะหนักก็จะอยู่ในรูปตะกอน ส่วนที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์ที่ไม่ใช่ออกซิเจนสามารถทนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำที่มีความเข้มข้นถึง 50-100 มก./ล. แต่

ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษ การลดพิษซัลไฟด์ทำได้โดยการตกตะกอนซัลไฟด์หรือการแยกซัลไฟด์ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบ

- พิษของอิออนและโลหะหนัก ที่มีความเข้มข้นสูงเกินปริมาณหนึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อระบบได้ อิออนที่สำคัญได้แก่ Na^{+} , K^{+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ S^{2-} อิออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนลบ นอกจากนี้อิออนบวกที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อจุลชีพน้อยกว่าอิออนที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 2 ถึง 10 เท่า

- พิษของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์บางชนิดจะยับยั้งการทำงานของจุลชีพแบบไร้ออกซิเจน สารพวกนี้ได้แก่ แอลกอฮอล์ และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เช่นเมทานอล ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้ สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้จุลชีพคุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10,000 มก./ล. ก็ตาม

2.3.8 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดสีน้ำกากส่าโดยวิธีทางชีวภาพ

Sirianuntapiboon และคณะ (1988) ได้นำราสายพันธุ์ D-90 ที่ได้จากการคัดพันธุ์ในประเทศไทยมาทำการศึกษาการกำจัดสีน้ำกากส่า โดยใช้น้ำกากส่าจากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ และใช้อากาศตามลำดับ แล้วนำมาวิเคราะห์ค่า BOD และ COD จากการทดลองพบว่ารา D-90 สามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 10 วัน และลดค่า BOD ได้ 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเลี้ยงรา D-90 ในสารละลายสีน้ำกากส่า หรือเมลานอยดินที่ได้จากโรงงานผลิตเอทานอลที่ผสมด้วยกลูโคส 2.5% โซเดียมไนเตรท 0.2% โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1% แมกนีเซียมซัลเฟต 0.05% และนำไปผ่านการตกตะกอน นำไประเหยและไดอะไลซ์นำมาปรับความเข้มข้นของสีด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร วัดได้ค่าเท่ากับ 3.5 ปรับความเป็นกรดด่างเท่ากับ 6.0 เป็นเวลา 10 วัน เมื่อการทดลองใช้น้ำกากส่าที่ไม่ได้ใส่สารอาหารลงไปพบว่าราD-90 สามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้เพียง 17.5% และในสภาวะที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อจะสามารถกำจัดสีได้ 70% ในเวลา 11 วันและลดค่า BOD 90% ในเวลา 15 วัน เมื่อทำการกำจัดสีเมลานอยดินในระบบกึ่งต่อเนื่อง (fedbatch) พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ประมาณ 80% ในเวลา 10 วันและลดค่า BOD 80%

Ohmomo, Daengsubha และคณะ (1988) ได้คัดเลือกจุลินทรีย์พวกกึ่งไม่ใช้อากาศ (facultative anaerobic) ที่มีความสามารถกำจัดสีน้ำกากส่า (melanoidin-decolorizing activity) หรือ MDA โดยคัดมาจากบ่อเก็บน้ำกากส่าในโรงงานผลิตเอทานอลพบว่ามีแบคทีเรียสายพันธุ์ *Lactobacillus hilgradii* สายพันธุ์ W-NS ที่มีความสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ 28% เมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ประกอบด้วยกลูโคส 1.0% ยีสต์ 0.2% เปปโตน 0.3% โปแตสเซียมได

ไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1% แมกนีเซียมซัลเฟต 0.5% ในสารละลายสีน้ำกากส่าเมลานอยดินที่ได้จากโรงงานผลิตเอทานอล เตรียมสารละลายด้วยวิธีการเดียวกันกับวิธีการข้างต้น ปรับความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7.3 ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต เลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เมื่อทำการปรับปรุงการกำจัดสีน้ำกากส่าด้วยวิธีการตรึงเซลล์ด้วยแคลเซียมอัลจิเนตแล้ว พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้เพิ่มมากขึ้นเป็น 40%

Ohmomo, Yahikawa และคณะ (1988) ได้ศึกษาการกำจัดสีน้ำกากส่าแบบระบบต่อเนื่องด้วยแบคทีเรีย *Lactobacillus hilgradii* สายพันธุ์ W-NS ที่ตรึงเซลล์ด้วยแคลเซียมอัลจิเนตแล้วในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีกลูโคส 1% ปรับความเป็นกรดด่างเท่ากับ 5.0 เลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำกากส่าได้ 90% ในเวลา 1 เดือน ในระหว่างนี้ต้องเติมเปปโตน 0.05% ลงในน้ำกากส่านั้นด้วย และเมื่อทำการทดลองในถังหมักแบบคอลัมน์ จะไม่สามารถบำรุงรักษาเชื้อได้และการกำจัดสีน้ำกากส่าจะลดลงครึ่งหนึ่งในเวลา 5 วัน เมื่อความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7.3 การกำจัดสีจะลดลงอีก

อำพรรณ (2543) ได้ใช้เชื้อ Acetic acid bacteria รหัส D39 พบว่ามีความสามารถในการลดสีน้ำกากส่าในอาหารเหลว Molasses Pigment Medium ได้สูงสุดประมาณ 45% โดยกลไกการลดสีน้ำกากส่าของเชื้อเกิดโดยการดูดซับสีเมลานอยดินไว้ที่ผิวของเซลล์ และเกิดจากกรดอะซิติกที่เชื้อผลิตทำให้เกิดการตกตะกอนสีของน้ำกากส่า ซึ่งกลไกทั้งสองนี้ไม่มีผลต่อการลดขนาดเม็ดสีเมลานอยดิน

Francisca Kalavathi และคณะ (2001) ได้ศึกษาการกำจัดเมลานอยดินในน้ำกากส่าโดย marine cyanobacterium ซึ่งคัดเชื้อมาจากโมลาส เชื้อจุลินทรีย์นี้อยู่ในกลุ่มของ *Oscillatoria boryana* BDU 92181 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้เมลานอยดินที่สกัดด้วยโอโซโพรพานอล แปรค่าความเข้มข้นของสีเป็น 0.01, 0.05 และ 0.1 % (W/V) ทิ้งไว้ 10 วัน ประสิทธิภาพในการลดสีคือ 33%, 60.6% และ 83% ตามลำดับ

2.3.9 งานวิจัยเกี่ยวกับระบบยูเอเอสบี

Lettinga และคณะ (1980) ได้สรุปว่าระบบยูเอเอสบีสามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ต่ำเช่นกัน ในการทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันฝรั่งและโรงงาน sugar-beet พบว่าระบบสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตะกอนจุลินทรีย์มีการพัฒนาตัวในน้ำเสียได้ดี มีลักษณะการตกตะกอนดี ประสิทธิภาพการ ผลิตก๊าซสูง ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆได้แก่ การอัดตัวของตะกอน ความสูงของตะกอนชั้นล่าง ความเข้มข้นของตะกอน นอกจากนั้นในการทดลองนี้ยังพบว่าระบบยูเอเอสบีเหมาะสมสำหรับกระบวนการ denitrification ในถังหมักที่สร้างกรด

Buijs และคณะ (1982) ได้แสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายของตะกอนแบคทีเรียในถังยูเอเอสบีซึ่งเป็นการป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังขึ้นไปด้านบนมีความสัมพันธ์กับความเร็วของน้ำเสียในถัง ปริมาณก๊าซที่เกิดและการตกตะกอนของตะกอนแบคทีเรีย

Wiegant และ Lettinga (1985) ได้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำกากส่า ซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีระหว่าง 1,700-35,110 มก./ล. ป้อนเข้าระบบยูเอเอสบีขนาด 5.75 ลิตร ที่อุณหภูมิ 55 ^{0}ซ แบบกึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous feed) จากการทดลองพบว่าปริมาณของมีเทนต่อกก.ของน้ำกากส่า จะลดลงเป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของน้ำกากส่าที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำกากส่ายิ่งมีความเข้มข้นมากสารยับยั้งหรือสารพิษก็จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้ VFA ของน้ำในถังยูเอเอสบีมีค่าสูง ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสารอินทรีย์ไปเรื่อยๆถึงจุดหนึ่งจะพบว่า VFA ของน้ำที่ออกจากระบบจะสูงขึ้นเรื่อยๆ และ VFA ที่สูงมีผลให้ประสิทธิภาพการเกิดมีเทนลดลง ในการทดลองใช้ตะกอนเม็ดจากระบบเทอร์โมฟิลิคอื่นเป็น Seed material ใช้ระยะเวลาเริ่มต้นเดินระบบ 4 เดือน ผลการทดลองคือระบบสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้ถึง 86.4 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ในปีเดียวกัน Wiegant และ Lettinga ได้ทำการทดลองเริ่มต้นเดินระบบเทอร์โมฟิลิคยูเอเอสบีในถังขนาด 5.75 ลิตร โดยใช้ seed material ต่างๆกันได้แก่ มูลวัว, mesophilic granular sludge และ digested sewage sludge และทั้งสามอย่างข้างต้นรวมกันในอัตราส่วนเท่าๆกัน พบว่า mesophilic granular sludge ใช้เริ่มต้นเดินระบบเทอร์โมฟิลิคยูเอเอสบีได้ดีที่สุด

Sanchez, Cardoba และ Sinerigt (1985) ได้ศึกษาความเหมาะสมในการใช้ระบบยูเอเอสบี เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นแอลกอฮอล์ (น้ำกากส่า) ในประเทศอาร์เจนตินา โดยทำการทดลองในถังหมักขนาด 100 ลิตร น้ำกากส่ามีค่าซีโอดี 35,000-100,000 มก./ล. พบว่าระบบสามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 24 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 75% มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 9 ล./ล.น้ำเสีย-วัน โดยมีก๊าซมีเทนเฉลี่ย 58% ความเร็วในการตกตะกอนของตะกอนแบคทีเรียจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของตะกอนแบคทีเรียนั่นเอง ตะกอนแบคทีเรียที่ไม่ได้รับอาหารนาน 1 เดือน ก็ยังสามารถปรับตัวให้มีประสิทธิภาพเหมือนเดิมได้

Seng, Fernandes และ Paskins (1985) ได้สรุปว่าการเกิด shock load ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียของแบคทีเรียในถังหมักและเมื่อระบบสามารถผ่านพ้นสภาวะนี้ไปแล้วจะกลับสู่สภาวะเดิม การเกิด shock load มักเกิดกับระบบ high rate ดังนั้นเมื่อทำการทดลองแบบ high rate จึงควรเจือจางน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบเป็นลำดับขั้นไป

I 21565016

Endo (1988) เสนอผลการทดลองว่าการเจริญของแบคทีเรียลักษณะเส้นยาวที่สร้างกรดบนผิวด้านนอกของตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ด จะเป็นสาเหตุให้เกิดสภาพ anaerobic sludge bulking ที่เป็นการสูญเสียตะกอนแบคทีเรียออกจากระบบ

สุพรรณ ชาตตระกูล และคณะ (2529) ได้ทำการวิจัยการบำบัดน้ำกากส่า โดยระบบยูเอเอสบี ขนาด 0.3 ลบ.ม. ที่อุณหภูมิ 31 ^{0}ซ น้ำกากส่ามีค่าซีโอดี 31,370-80,360 มก./ล. รับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้ 2.3-15.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เวลาเก็บกัก 4.3-15.6 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 49-66% ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 194-1,100 ลิตร/วัน ก๊าซชีวภาพมีมีเทนเป็นส่วนประกอบ 70-80%

ณรงค์ จิตต์จรุงเกียรติ (2529) ได้ทำการทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตนมถั่วเหลืองบรรจุขวด มีค่าซีโอดี 13,250-39,750 มก./ล. ป้อนเข้าระบบยูเอเอสบีขนาด 0.25 ลบ.ม. ที่อุณหภูมิห้อง สามารถรับอัตราป้อนสารอินทรีย์ได้ 2.65-7.95 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่เวลาเก็บกัก 5 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 58-95% ผลิตก๊าซมีเทน 170-262 ลิตร/วัน

อรุณี วจนะวิจัย และธีระ เกรอต (2533) ทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเบียร์โดยระบบยูเอเอสบีที่อุณหภูมิ 35 ^{0}ซ ทำการทดลองในถังขนาด 300 ลิตร น้ำเสียมีค่าซีโอดี 350-4,000 มก./ล. อัตราป้อนสารอินทรีย์ 0.35-23.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่เวลาเก็บกัก 4-24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 90-94% อัตราการเกิดก๊าซมีเทน 211-350 ลิตร/กก. ซีโอดีที่ถูกกำจัด มีสัดส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพ 74-81%

Cheng (1991) ทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานสุราอยุธยากับระบบเทอร์โมฟิลิคยูเอเอสบี (55 ^{0}ซ) ขนาด 0.13 ลบ.ม. น้ำเสียที่เข้ามีค่าซีโอดี 9,801-10,476 มก./ล. อัตราป้อนสารอินทรีย์ 2.2-25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เวลาเก็บกัก 0.4-5 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 50-60% อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 43-536 ลิตร/วัน ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยมีเทนเฉลี่ย 61-77%

Jayadevan (1992) ทำการทดลองใช้ระบบเทอร์โมฟิสิคยูเอเอสบีกับน้ำกากส่าจากโรงงานสุราอยุธยาเช่นเดียวกับ Cheng ถังทดลองมีขนาด 0.13 ลบ.ม. ซีโอดีน้ำกากส่า 10,000 มก./ล. อัตราป้อนสารอินทรีย์ 19-27 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เวลาเก็บกัก 11-8.6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 34-60% อัตราการเกิดมีเทน 226-435 ลิตร/วัน

วันชัย วงศ์เทียนชัย (2545) ทดลองบำบัดน้ำกากส่าจากบ่อที่ผ่านการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมาเจือจางให้มีค่าซีโอดี 1,500 มก./ล. โดยใช้ระบบแอนแอโรบิกไฮบริดยูเอเอสบี เวลาเก็บกักน้ำเสีย 36 ชั่วโมง แบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด การทดลองชุดที่ 1 เติมน้ำตาลเป็นอาหารเสริม การทดลองชุดที่ 2 เติมน้ำตาลกับน้ำนมถั่วเหลือง และการทดลองชุดที่ 3 เติมน้ำนมถั่วเหลือง ประสิทธิภาพการลดสี 5-10%, 6-13% และ 11-15% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 26-57%, 49-70% และ 60-78% ตามลำดับ

อิศระ รัตนปริยานุช (2546) ทดลองบำบัดน้ำกากส่าจากบ่อบำบัดไร้อากาศมาทำการเจือจางและใช้น้ำตาลเป็นสารอาหารปฐมภูมิ โดยมีอัตราส่วนซีโอดีของน้ำกากส่าต่อซีโอดีของน้ำตาลเป็น 1:3 การทดลองมีค่าภาระบรรทุก 4, 5, 6 และ 7 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน การศึกษาแบ่งเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนที่หนึ่ง หาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมของถังหมักกรดในแต่ละภาระบรรทุก ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่า 16.7% 17.3% 14.9% และ 14.9% ตามลำดับ ใช้เวลา 6, 6, 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดสี 21.2% 21.7% 20.9% และ 19.5% ตามลำดับ การทดลองขั้นที่สอง ใช้เวลาเก็บกักในถังหมักกรดจากขั้นตอนที่หนึ่งมาทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแอนแอโรบิกไฮบริดฟิลเตอร์ที่มีถังหมักกรดนำ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 65.6% 64% 55.4% และ 52% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดสี 28.1% 25.2% 22.8% และ 20% ตามลำดับ

Blonskaja และคณะ (2003) ทดลองบำบัดน้ำกากส่ามีค่าซีโอดี 49,000-53,000 มก./ล. โดยใช้ระบบแอนแอโรบิกฟิลเตอร์ (Anaerobic filter, AF) ร่วมกับระบบยูเอเอสบี (UASB) seedที่ใช้ในการเดินระบบ AF ได้มาจากโรงงานผลิตเนย ส่วน seed ที่ใช้ในการเดินระบบ UASB นำมาจากโรงงานน้ำตาล การทดลองใช้ HRT 10-19 วัน ภาระบรรทุก 2.5-5.1 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ในระบบ AF และในระบบ UASB ใช้ HRT 20-39 วัน ภาระบรรทุก 0.6-2.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 54 และ 93% ตามลำดับ

2.4 ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed)

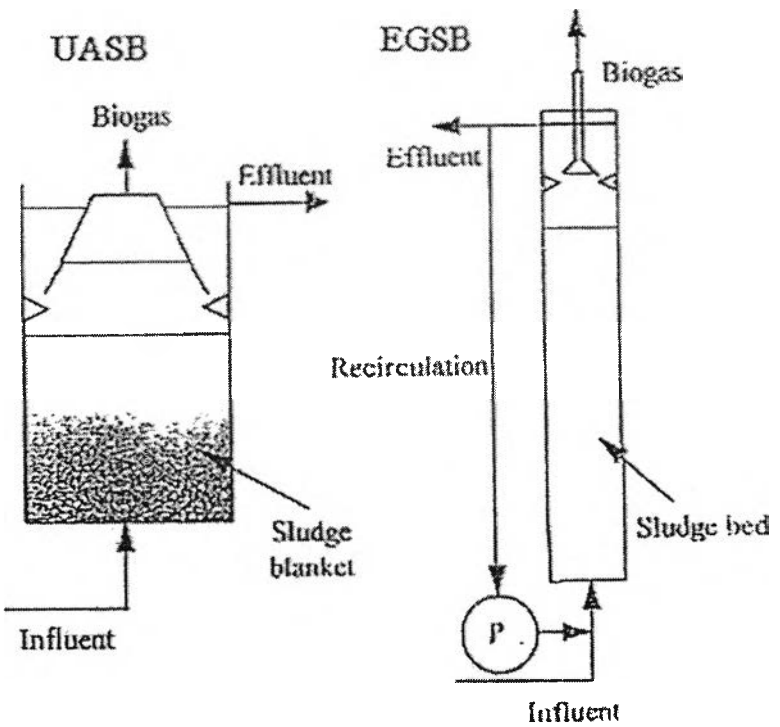
2.4.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตรวมกันเป็นเม็ด ในการบำบัดน้ำเสีย การสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสีย จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพและการทำงานของระบบ ในระบบยูเอเอสบีมีโอกาสที่จะเกิดการไหลลัดทางของน้ำเสียอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เช่น การกระจายจุดน้ำเข้าไม่เพียงพอ ความเร็วน้ำเข้าระบบต่ำ หรือก๊าซที่เกิดน้อย เป็นต้น การหมุนเวียนน้ำกลับในระบบยูเอเอสบีช่วยเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสียให้เพียงพอ ซึ่งมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ (Lettinga และคณะ, 1983) อีกทั้งยังช่วยเจือจางน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง หรือน้ำเสียที่เป็นพิษก่อนเข้าระบบ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

ระบบ EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) เป็นระบบที่ได้พัฒนามาจากระบบ UASB เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการสัมผัสกันของน้ำเสียและจุลชีพด้วยการทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์และการกวนผสมที่ทั่วถึง โดยระบบนี้มีปัจจัยที่สำคัญคือความเร็วการ

ไหลในถังปฏิกรณ์สูงกว่าระบบ UASB ทั่วไป ทั้งนี้ความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์สามารถเพิ่มได้โดยการติดตั้งระบบเวียนกลับน้ำทิ้ง (recirculation) ถังปฏิกรณ์ของระบบ EGSB มีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างค่อนข้างมาก ระบบการเวียนกลับส่งผลให้ความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์มีค่าสูงถึง 5-6 ม./ชม. ในขณะที่ระบบ UASB ทั่วไปมีค่าความเร็วการไหลอยู่ในช่วง 0.5-1.5 ม./ชม. หรือต่ำกว่า (Kato และคณะ, 1994)

ระบบ EGSB เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศแบบชั้นของเม็ดสลัดจ์ (granules) คล้ายกับระบบ UASB แต่แตกต่างกันที่ระบบนี้มีการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ทั้งชั้นหรือขยายตัวบางส่วน และความคงตัวของระบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกตะกอนและความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดสลัดจ์ (granules) ในขณะที่ความเร็วการไหลเป็นปัจจัยที่ควบคุมเพื่อให้มีการผสมที่ดีระหว่างน้ำเสียกับจุลชีพ แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยนี้อาจส่งผลต่อการล้างออก(wash out) ของสลัดจ์ด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้เกิดความสมดุลระหว่างการกวนผสมที่เพียงพอและรักษาปริมาณสลัดจ์ในระบบ



รูปที่ 2.13 แผนผังส่วนประกอบของระบบ UASB และ EGSB โดย P คือเครื่องสูบเวียนกลับ (Seghezzo และคณะ, 1998)

2.4.2 คุณสมบัติของระบบอีจีเอสบี (Seghezzo และคณะ, 1998)

1) ค่าความเร็วการไหลสูงอยู่ในช่วงประมาณ 4-10 เมตร/ชม. และภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ UASB โดยสูงถึง 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

2) ชั้นของสลัดจ์มีการขยายตัว

3) มีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่เจือจางหรือมีความเข้มข้นต่ำ

4) สลัดจ์มีลักษณะเป็นเม็ด (granules) อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง และมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดี

5) ลักษณะการกวนผสมต่างจากระบบ UASB กล่าวคือ เนื่องจากค่าความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์ (Vup) สูง และปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสัมผัสที่ดีระหว่างน้ำเสียและชั้นสลัดจ์

6) ความดันของสลัดจ์บริเวณชั้นล่างมีค่าสูงในกรณีที่ถังปฏิกรณ์สูงมาก แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบและการเจริญเติบโตของจุลชีพ

7) สลัดจ์ชนิดฟลอค (flocculent sludge) จะถูกล้างออก (wash out) จากระบบ

8) ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ค่อนข้างต่ำ

ถังปฏิกรณ์ในระบบ EGSB มีคุณสมบัติในการรับภาระบรรทุกที่สูงใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดส์โดยที่ไม่ต้องใช้ตัวกลางของแข็ง (media) ระบบ EGSB มีคุณสมบัติในการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) ที่ดีกว่าระบบ UASB (Kato, 1994) และเหมาะที่จะใช้ในกรณีที่มีอัตราการเกิดก๊าซที่ต่ำและการผสมที่ไม่เพียงพอ เช่นในกรณีของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ หรือในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ (Psychrophiles) และเหมาะสมที่จะใช้บำบัดที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง ๆ ด้วย (Seghezzo และคณะ, 1998) นอกจากนี้การดำเนินระบบ EGSB สามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของชั้นสลัดจ์ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับการทดลองระบบ UASB ในห้องปฏิบัติการที่มีอัตราการเกิดก๊าซสูง (Kato และคณะ, 1994)

Kato และคณะ (1994) กล่าวว่าระบบ EGSB เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำเนื่องจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพที่ต่ำในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังจะพบได้จากรายงานการวิจัยระบบ UASB ทั่วไปที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งไม่สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ค่าซีโอดีในน้ำเสียซึ่งมีค่าต่ำจะส่งผลต่อระดับของ substrate ที่ต่ำลงเรื่อยๆ ตามชั้นความลึกในเม็ดจุลชีพ ทำให้เม็ดจุลชีพนั้นมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือย่อยสลาย substrate ที่ต่ำ สมการโมโนด์ได้แสดงว่าอัตราการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอาหาร (substrate) อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับค่า Ks ซึ่งเป็นค่าที่แสดง

ถึงคุณลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียต่อสารอาหารนั้นๆ Kato ได้แบ่งค่า Ks ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) Intrinsic Ks เป็นค่า Ks ที่แท้จริงซึ่งแสดงถึงการถ่ายเทของมวลสาร (substrate) เข้าไปยังเซลล์ของแบคทีเรียที่มีลักษณะการเจริญเติบโตในน้ำเสียแบบกระจาย (dispersed bacterial cells) ในสภาพที่เซลล์แบคทีเรียมีการแขวนลอยอย่างสมบูรณ์

2) Apparent Ks เป็นค่า Ks ปรากฏที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทของมวลสารผ่าน biofilm ที่ห่อหุ้มอยู่รอบนอกของกลุ่มเซลล์แบคทีเรียหรือเม็ดจุลชีพ (granules)

Apparent Ks จะมีค่าสูงกว่า Intrinsic Ks เนื่องจากพบว่ามีข้อจำกัดหรืออุปสรรคในการถ่ายเทมวลสารผ่าน biofilm ของเม็ดจุลชีพมากกว่าใน dispersed bacterial cells ดังนั้นจะพบว่ามีความเข้มข้นของสารอาหารที่ต่ำลงเรื่องๆตามความลึกในเม็ดจุลชีพ และไม่มีอาหารที่เพียงพอต่อ จุลชีพที่อยู่ในชั้นในของเม็ดจุลชีพ และแบคทีเรียที่อยู่ชั้นลึกๆ ซึ่งขาดอาหารจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นโพรงว่างบริเวณแกนกลางของเม็ดจุลชีพ ส่งผลให้เกิดการ wash out ของเม็ดจุลชีพจากการที่มีก๊าซสะสมตัวอยู่ภายในและนอกจากนี้โครงสร้างเม็ดจุลชีพที่จับกันหลวมๆ ยังสามารถเกิดการแตกสลายเนื่องจากความปั่นป่วนทางชลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์ได้

การที่จะทำให้มีสารอาหารที่เพียงพอต่อจุลชีพ จำเป็นที่จะต้องเกิดอัตราการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้น biofilm ได้เร็วกว่าอัตราการย่อยสลายอาหารโดยจุลชีพในเม็ดจุลชีพ ดังนั้นในการบำบัด น้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำๆจำเป็นที่จะต้องมีการกวนผสมที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดความปั่นป่วนของการไหลในชั้นสลัดจ์และส่งผลให้ค่า Apparent Ks มีค่าต่ำลง ความปั่นป่วนดังกล่าวในระบบที่บำบัด น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงเกิดขึ้นได้โดยปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตในขณะที่ระบบ EGSB ทำได้โดยการปรับอัตราการสูบเวียนกลับเพื่อเพิ่มความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์

Dolfing (1985) กล่าวว่าในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ กลุ่มจุลชีพจะต้องถูกรักษาไว้ในถังปฏิกรณ์เป็นระยะเวลานาน ซึ่งส่งผลให้กลุ่มจุลชีพรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและเกิดชั้น biolayer ที่หนาแน่น ซึ่งชั้น biolayer เหล่านี้จะเป็นตัวที่ทำให้สารอาหารไม่สามารถกระจายเข้าไปยังชั้นลึกๆได้ เนื่องจากเกิดการต้านทานการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer resistance) ปรากฏการณ์นี้จะมีผลกระทบที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมในถังปฏิกรณ์ค่า gradient ของความเข้มข้นใน biolayer อธิบายโดยใช้สมการของ Fick (Fick's first law)

$$F = - Ø D \frac{dC}{dx} \qquad (16)$$

F คือ flux ของมวลสาร หรือ substrate

Ø คือ ความพรุนของ biolayer

D คือ diffusion coefficient

dC/dx คือ gradient ของ substrate ใน biolayer

สมการนี้ได้อธิบายว่า flux ของสารอาหารที่ผ่าน biolayer ขึ้นอยู่กับ gradient ของความเข้มข้นและยังขึ้นกับปฏิกิริยาจำเพาะกับขนาดรูปร่างของ biolayer ดังนั้นแบคทีเรียที่อยู่ในชั้นในจะได้รับ substrate ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าที่ผิวเม็ดจุลชีพ ส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารอาหาร ซึ่งอธิบายโดยสมการโมโนด์ว่าความเร็วของการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับความเข้มข้นของสารอาหารมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงที่ความเข้มข้นของสารอาหารมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าค่า Ks เพราะฉะนั้น mass transfer resistance จะเป็นปัจจัยสำคัญในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารอาหารมีค่าใกล้เคียง Ks หรือต่ำกว่า หรือเมื่อ gradient ของความเข้มข้นสารอาหารใน biolayer อยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นนี้ และได้สรุปว่า mass transfer resistance ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1) ความเข้มข้นของสารอาหาร

2) ค่า Ks ของแบคทีเรียสำหรับประเภทของ substrate นั้น

3) ความหนาของ biolayer พบว่า mass transfer resistance จะไม่มีผลต่อ biofilm ที่มีค่าต่ำกว่า 1 มม.

4) ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดใน biolayer

2.4.3 งานวิจัยอีจีเอสบีที่ผ่านมา

Lettinga และคณะ (1993) แนะนำให้ใช้น้ำเข้ามีค่าซีโอดีในขณะเริ่มเดินระบบอยู่ระหว่าง 1,000-5,000 มก./ล. ส่วนน้ำเสียที่เข้มข้นสูงควรหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อเจือจางน้ำเข้าระบบให้มีค่าซีโอดีต่ำกว่า 15,000 มก./ล. เพื่อลดปริมาณสภาพด่างที่ต้องเติมและเพิ่มการสัมผัสระหว่างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และน้ำเสีย ใช้การหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อฟื้นระบบยูเอเอสบีที่ล้มเหลวเนื่องจากมีกรดสะสมในระบบจำนวนมากในการบำบัดน้ำเสียชุมชน

Rinzema และคณะ (1993) กล่าวว่าระบบ EGSB สามารถที่จะใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษที่ความเข้มข้นสูงๆ เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ สามารถบำบัดน้ำเสียประเภท long chain fatty acid ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 30 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี 85-95%

Ching-Shyung Hwu และคณะ (1998) ทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดี 400 มก./ล. ในถังปฏิกรณ์ EGSB มีปริมาตร 4.4 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 56 มิลลิเมตร และเดินระบบไปพร้อมกันทั้ง thermophilic (55 องศาเซลเซียส) และ mesophilic (30 องศาเซลเซียส) HRT 24 ชั่วโมง แล้วแปรค่าความเร็วไหลขึ้น 1, 4 และ 7 ม./ชม. ค่า pH 7 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 82-89% จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วไหลขึ้น (Vup) มากขึ้น ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ลดลง

ในช่วง thermophilic ผลิตก๊าซมีเทนได้ 70%, 49% และ 39% ตามลำดับ ในช่วง mesophilic ผลิตก๊าซมีเทนได้ 70%, 59% และ 53% ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าระบบ EGSB ที่ความเร็วไหลขึ้นมากกว่า 4 ม./ชม. และ HRT น้อยกว่า 10 ชั่วโมง จะทำให้เกิดการกวน และเพิ่มการสัมผัสของสารอาหารกับเซลจุลชีพได้มากขึ้น โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

Seghezzo และคณะ (1998) กล่าวว่า ระบบ EGSB เป็นระบบบำบัดไร้อากาศซึ่งมีความเหมาะสมที่ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 40 ก.ก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมีค่าความเร็วการไหลสูงอยู่ในช่วงประมาณ 4-10 เมตร/ชม.

D.Jeison and R.Chamy (1999) เปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสีย UASB กับ EGSB โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตเบียร์เจือจางด้วยน้ำประปาให้มีค่าซีโอดีเหลือ 500 มก./ล. ความเร็วไหลขึ้น 1.8-10.5 ม./ชม. ในระบบ EGSB และ ความเร็วไหลขึ้น 0.6-1.3 ม./ชม. ในระบบ UASB ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งสองระบบใกล้เคียงกันคือ 80% ลักษณะชั้นตะกอนในระบบ UASB อัดแน่นกว่าระบบ EGSB อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดในระบบ EGSB ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วไหลขึ้น (Vup) มีค่า 0.4-0.25 ล./ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด เนื่องจากความปั่นป่วนของน้ำที่เกิดจากการเวียนน้ำเป็นผลทำให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นละลายลงในกระแสน้ำ (outlet stream) ส่วนระบบ UASB อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.25 ล./ก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด มีค่าค่อนข้างคงที่ จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วในช่วง 2-5 ม./ชม. จะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีดีที่สุดในระบบ EGSB และระบบ EGSB มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าระบบ UASB เพียง 5-10% สำหรับน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ