# บทที่ 2

# แนวคิด ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 น้ำกากส่า (Molasses Wastewater)

น้ำกากส่าเป็นของเสียเหลือทิ้งที่ระบายออกจากหอกลั่นแอลกอฮอล์มีปริมาณเฉลี่ย 8 -15 ลิตรต่อลิตรของแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ (Mohana *et al*, 2009) วัตถุดิบที่ใช้ผลิตแอลกอฮอล์มีหลายชนิด เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพดเป็นต้น โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 61 มาจากอ้อย และเกือบทั้งหมดที่มาจากอ้อยอยู่ในรูปของกากน้ำตาล (Molasses) ลักษณะของน้ำกากส่าประกอบด้วยสารหลายชนิดที่มีพิษต่อจุลินทรีย์ได้แก่ พอลลิเมอร์น้ำตาลดำที่เรียกว่า เมลานอยดิน (Melanoidin) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ รวมทั้งคาราเมลและสารประกอบที่แตกตัวจากน้ำตาลได้แก่ แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) แทนนิน (Tannin) และซีโนไบโอติก (Xenobiotic) ซึ่งเป็นสารประกอบเคมีอินทรีย์ที่เป็นพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเอทานอล และทนต่อการย่อย (ดรรชนี พานพิกุล, 2555)

### 2.1.1 ลักษณะของน้ำกากส่าจากโรงงานผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

น้ำกากส่ามีสภาพเป็นกรดโดยค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 3.0 - 4.5 มีค่าบีโอดีสูงอยู่ในช่วง 45,000 - 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดีมีค่าอยู่ในช่วง 90,000 - 190,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 75,000 - 190,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สารอินทรีย์ในรูปของไนโตรเจนรวม ซัลเฟตและคลอไรด์มีค่าสูงเช่นเดียวกัน (Mohana *et al*, 2009) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้น้ำกากส่ายังมีสีน้ำตาลดำ (Dark brown) ซึ่งเป็นสีที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยสารที่ก่อให้เกิดสี ได้แก่ เมลานอยดินและคาราเมล (ดรรชนี พานพิกุล, 2555)

**ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติน้ำกากส่าจากโรงงานผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล**

| ดรรชนีชี้วัด | จำนวน (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| BOD | 50,000 - 60,000 |
| COD | 110,000 - 190,000 |
| Total solid (TS) | 110,000 - 190,000 |
| Total volatile solid (TVS) | 80,00 - 120,000 |
| Total dissolved solids (TDS) | 90,000 - 150,000 |
| Chlorides | 8,000 - 8,500 |
| Sulphate | 7,500 - 9,000 |
| Phosphate | 2,500 - 2,700 |
| Total nitrogen | 5,000 - 7,000 |

**ที่มา :** ดัดแปลงจาก Mohana *et al*, (2009)

**2.1.2 ประโยชน์จากน้ำกากส่า**

เมื่อพิจาณาองค์ประกอบของน้ำกากส่าพบว่า น้ำกากส่ามีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ซับซ้อน ดังนั้นการนำน้ำกากส่ามาใช้ประโยชน์ทางด้านจุลชีววิทยาต้องอาศัยจุลินทรีย์ที่มีความสามารถเฉพาะตัวในการที่จะใช้น้ำกากส่าเป็นวัตถุดิบ และให้ผลผลิตอื่น ๆ

1) การนำน้ำกากส่ามาใช้ประโยชน์ในรูปของปุ๋ย โดยใช้วิธีเผา (Incineration) ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องระเหย เมื่อทำการแล้วจะได้ผลพลอยได้คือ ขี้เถ้าโพแทสเซียมในสัดส่วนสูง สามารถใช้เป็นปุ๋ยได้

2) การนำน้ำกากส่าทำปุ๋ยหมัก โดยอาศัยเชื่อจุลินทรีย์บางชนิดหมักร่วมกันกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น ชานอ้อย ใบอ้อย ซางข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น

3) การนำน้ำกากส่าใช้ราดถนนลูกรังเพื่อลดฝุ่น โดยวิธีนี้สามารถใช้ได้ปริมาณจำกัดใช้ในฤดูแล้งเท่านั้น เพราะช่วงฤดูฝนจะโดนน้ำฝนชะล้างไป

4) การใช้น้ำกากส่าในการเลี้ยงปลา แต่ต้องใช้ปริมาณที่จำกัด เนื่องจากเป็นอันตรายต่อปลาได้เพาะจะทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลง

5) ใช้น้ำกากส่าในการเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตเป็นโปรตีนเซลล์เดียว

6) การนำน้ำกากส่าไปใช้ในการหมักก๊าซมีเทน โดยใช้จุลินทรีย์ชนิดไร้ออกซิเจน

**2.1.3 การบำบัดน้ำกากส่าของโรงงานอุตสาหกรรม**

จากข้อมูลการศึกษาผลผลิตเอทานอลในประเทศไทยในเดือนเมษายน 2554 พบว่าเอทานอลที่ผลิตจากกากน้ำตาลมีปริมาณ 1,172,855 ลิตรต่อวัน (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2554) เมื่อเทียบอัตราส่วนผลผลิตเอทานอลต่อน้ำเสียแล้ว ค่าเฉลี่ยน้ำกากส่าที่ออกจากกระบวนการผลิตเท่ากับ 14,660,688 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีปริมาณสูงมาก นอกจากนี้หลายบริษัทที่ผลิตเอทานอลยังประสบปัญหาเรื่องการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเนื่องจากบ่อกักเก็บไม่เพียงพอ (สำนักงานเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2554)

**1.2 ประเภทของการบำบัดน้ำเสีย**

การบำบัดน้ำเสียและสลัดจ์อินทรีย์มี 2 วิธี คือ แบบใช้อากาศและแบบไม่ใช้อากาศ การบำบัดแบบใช้อากาศอาศัยแบคทีเรียที่หายใจด้วยออกซิเจนในอากาศ ส่วนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศอาศัยแบคทีเรียที่หายใจด้วยสารอย่างอื่นที่ไม่ใช้อากาศ เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียและสลัดจ์จึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศและเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

**1.2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ**

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดสารอินทรีย์ (ซีโอดีและบีโอดี) ที่อยู่ในน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศอาศัยแบคทีเรียที่หายใจด้วยออกซิเจน (ในอากาศ) เป็นผู้ทำลายหรือกินสารอินทรีย์

$$\text{สารอินทรีย์ + ออกซิเจน} \xrightarrow[\text{ใช้อากาศ}]{\text{แบคทีเรีย}} \text{เซลล์ใหม่ + } CO_2 \text{ + สารอินทรีย์ที่เหลือ}$$

ภายหลังการบำบัดสารอินทรีย์หรือซีโอดีจะเหลืออยู่น้อยมากและมีเซลล์ใหม่ของแบคทีเรียเกิดขึ้นมามาก เมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

**1.2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ**

การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศอาศัยแบคทีเรียที่หายใจด้วยสารอื่นที่ไม่ใช่อากาศเป็นผู้ทำลายสารอินทรีย์ แบคทีเรียชนิดนี้จึงไม่เหมือนกับแบคทีเรียที่หายใจด้วยอากาศ

$$\text{สารอินทรีย์ + สารอื่นที่ใช้หายใจ} \xrightarrow[\text{ไม่ใช้อากาศ}]{\text{แบคทีเรีย}} \text{เซลล์ใหม่ + } CO_2 \text{ + สารอินทรีย์ที่เหลือ}$$

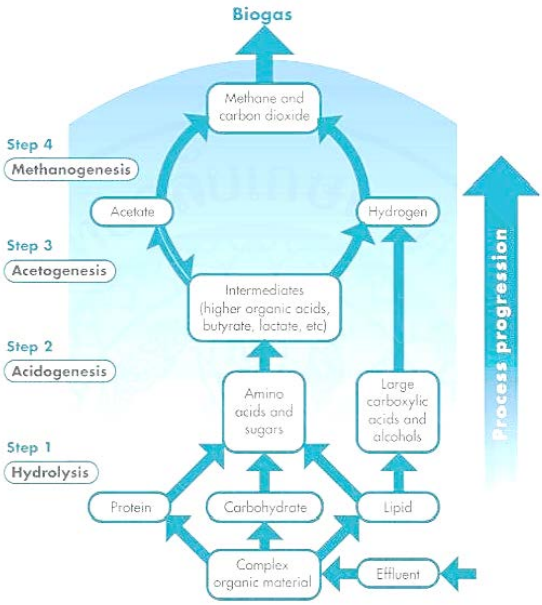
ภายหลังการบำบัดสารอินทรีย์จะเหลืออยู่มากแต่จะมีเซลล์ใหม่เกิดขึ้นน้อยโดยทั่วไปมักเข้าใจกันว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศหมายถึงระบบไม่ใช้อากาศที่ผลิตกาซมีเทนซึ่งเป็นระบบที่อาศัยแบคทีเรียที่หายใจด้วย $CO_2$ การบำบัดน้ำเสียจึงเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\text{สารอินทรีย์ + } CO_2 \xrightarrow[\text{ไม่ใช้อากาศ}]{\text{แบคทีเรีย}} \text{เซลล์ใหม่ + } CO_2 + CH_4 \text{ + สารอินทรีย์ที่เหลือ}$$

แต่แท้ที่จริงแล้ว ในโลกของแบคทีเรียไม่ใช้อากาศยังมีแบคทีเรียอื่นที่ไม่ได้หายใจด้วย $CO_2$ หรือ $O_2$ อีกหลายชนิดแบคทีเรียเหล่านั้นมีชีวิตอยู่ได้โดยหายใจสารอื่น เช่น $NO_3$, $SO_4$, $Fe_2O_3$, FeOOH, $MnO_2$ เป็นต้น

## 2.3 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการทางชีววิทยาของแบคทีเรียในสภาพปราศจากออกซิเจนอิสระ โดยแบคทีเรียในกระบวนการนี้มีอยู่ 2 กลุ่มที่ทำงานร่วมกัน คือ แบคทีเรียสร้างกรด (Acid former or Non-methanogenic bacteria) และแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ (สรัญญา คำภีระ, 2556) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังภาพที่ 2.1 สำหรับการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะมีการควบคุมไม่ให้ปฏิกิริยาเกิดขั้นตอนที่ 4 หรือในกระบวนการหมักมีเทน โดยปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ซึ่งรวมเรียกว่า ปฏิกิริยาการหมักกรด (ดรรชนี พานพิกุล, 2555)




**ภาพที่ 2.1** กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน
**ที่มา :** ชาญศักดิ์ ไชยสิทธิ์ (2555)

### 2.3.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เป็นต้น ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็กที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมัน ตามลำดับ (ศิรินารถ บุญอาษา, 2554) โดยแบคทีเรียหลายจำพวก ส่วนใหญ่จะเป็นพวกแบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรียเหล่านี้จะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ ซึ่งจะช่วยลดพลังงานกระตุ้น เป็นการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาเป็นโปรตีนที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อ

ปฏิกิริยาและสารที่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมานอกเซลล์จึงขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่มีในน้ำเสีย เช่น แป้ง และไกลโคเจนต้องใช้เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ไขมัน และลิปิด ต้องใช้เอนไซม์ไลเปส (Lipase) โปรตีนต้องใช้เอนไซม์โปรตีเอส (Protease) เป็นต้น โดยขั้นตอนนี้เป็นเพียงขั้นตอนการลดขนาดโมเลกุลเท่านั้นยังไม่มีการลดปริมาณของสารอินทรีย์ (สรัญญา คำภีระ, 2556)

**2.3.2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)**

ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน โดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) ภายในเซลล์แล้วเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid: VFA) เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) และกรดบิวทิริก (Butyric Acid) เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย (สรัญญา คำภีระ, 2556)

**2.3.4 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)**

แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน กล่าวคือ กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นจากกระบวนการสร้างกรดไขมันระเหย จะเป็นสารอาหารให้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (Methanogen) แต่เนื่องจากแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทิริก กรดโพรไพโอนิก เป็นสารอาหารได้ จึงต้องอาศัยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก ทำการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติกคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน เพื่อให้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้ต่อไป (สรัญญา คำภีระ, 2556)

**2.3.5 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)**

เป็นผลผลิตจากขั้นตอนที่ 2 คือ กรดอะซิติก เมทานอล ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซก๊าซมีเทนในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งเจริญเติบโตอย่างช้า ๆ ในน้ำเสีย โดยขบวนการสร้างก๊าซมีเทนนี้จะเกิดขึ้นได้ช้า (สรัญญา คำภีระ, 2556)

## 2.4 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

### 2.4.1 แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟต์ สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด – ด่าง ระหว่าง 4.0 - 6.5 และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดีมีอัตราการเจริญเติบโตสูงแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1) อะซิโดเจนนิคแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้แก่ กรดอะซิติกกรดโพรพิออนิกกรดบิวทีริกกรดฟอร์มิกเป็นต้น นอกจากนี้ยังได้สารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียในกลุ่มนี้ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ชอบอากาศและแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative anaerobic bacteria)

2) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซีสและอะซิโดเจนีซีสแล้วเปลี่ยนเป็นให้กรดอะซิติกสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

(1) Hydrogen producing acetogenic bacteria แบคทีเรียในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซีส ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลายตัวแล้วได้เป็นกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนหรือกรดอะซิติกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนหรือกรดอะซิติกและก๊าซไฮดดรเจนเป็นผลผลิตดังสมการที่ (1) สมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$C_2H_5OH + H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2 \quad (1)$$

$$C_2H_5COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad (2)$$

$$C_3H_7COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \quad (3)$$

(2) Homoacetogenic bacteriaแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

ก. Autotroph ได้แก่แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ในการเจริญเติบโตและได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นอะซิเตต (หรือกรดอะซิติก) ดังสมการ

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

ข. Heterotroph ได้แก่แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอมในการเจริญเติบโตผลผลิตที่ได้มีทั้งอะซิเตตและโพรพิออเนตซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการผลิตก๊าซก๊าซมีเทน ดังสมการ

$$3C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 4C_2H_5COOH + 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2O$$

*หมายเหตุ: การที่กรดอินทรีย์ซึ่งเป็นกรดอ่อน เมื่อละลายน้ำแล้วจะอยู่ในรูปเกลือของกรด เรียกเป็น-เอต เช่น กรดอะซิติก เมื่อแตกตัวได้เป็นอะซิเตต และไฮโดรเจนไอออน

**2.4.2 แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)**

แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้ไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing hemolithotrophs ซึ่งเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นก๊าซมีเทนดังสมการ

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

แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญคือจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศขั้นตอนที่ 2 โดยช่วยคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลงซึ่งมีผลต่อการเกิด อะซิเตตอย่างต่อเนื่อง

2) Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ประมาณ 2 ใน 3 เกิดจากการเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetotrophic methanogens และที่เหลือเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens

## 2.5 ถังปฏิกรณ์แบบ UASB reactors

### 2.5.1 แนวความคิดเบื้องต้นของถังปฏิกิริยายูเอเอสบี

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนเท่าที่ผ่านมาประสพปัญหาบางประการในการออกแบบและควบคุมการทำงานได้แก่ การแยกชีวมวล (Biomass) ไม่ให้หลุดออกไปกับน้ำออก (Effluent) ระยะเวลากักน้ำ (Hydraulic retention time, HRT) นานกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน และเสถียรภาพในการทำงานของระบบต่ำ เป็นต้น จากปัญหาที่กล่าวมาแล้ว (Stander, 1966) ซึ่งเป็นผู้ค้นพบความสำคัญของการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีอยู่ในถังหมักเป็นจำนวนมาก โดยทำถังตกตะกอนติดตั้งอยู่ที่ส่วนบนของถังหมักเพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำมาเก็บไว้ในถังหมักอีก ซึ่งการทำเช่นนี้สามรถที่จะลดระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียให้สั้นลง และยังสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบได้มากขึ้นด้วย (Lettinga *et al*, 1980) ได้พัฒนาแนวความคิดของ Stander โดยการเปลี่ยนแปลงวิธีการแยกก๊าซและการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำออก จึงได้เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket process, UASB process)

**2.5.2 ลักษณะและการทำงานของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี**

ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนชนิดหนึ่ง หลักการในการเดินระบบจะทำการเลี้ยงตะกอนแบคทีเรียให้สะสมอยู่ในถังปฏิกิริยา และมีปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากระบบน้อย โดยไม่ใช้ตัวกลางเพื่อให้ตะกอนเกาะติด ทั้งนี้ตะกอนแบคทีเรียที่อยู่ภายในระบบจะรวมตัวกันในรูปของเม็ดตะกอน (Granule) ที่มีน้ำหนักมากตกตะกอนได้ดี เกิดเป็นลักษณะชั้นตะกอนในบริเวณด้านล่างของถัง ทั้งนี้ขนาดของเม็ดตะกอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่จ่ายเข้าระบบ กลไกการทำงานและลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากมีตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและตกตะกอนไม่ได้อยู่ในระบบ การที่จะรักษาตะกอนส่วนนี้ไว้ต้องติดตั้งส่วนตกตะกอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกน้ำเสีย ตะกอนแบคทีเรียและก๊าซชีวภาพออกจากกัน (Gas solid separator, GSS) ไว้ตอนบนของถัง เพื่อป้องกันให้ตะกอนหลุดออกจากถัง และเป็นการเพิ่มเวลาเก็บกักตะกอนในถังปฏิกิริยาให้นานขึ้น

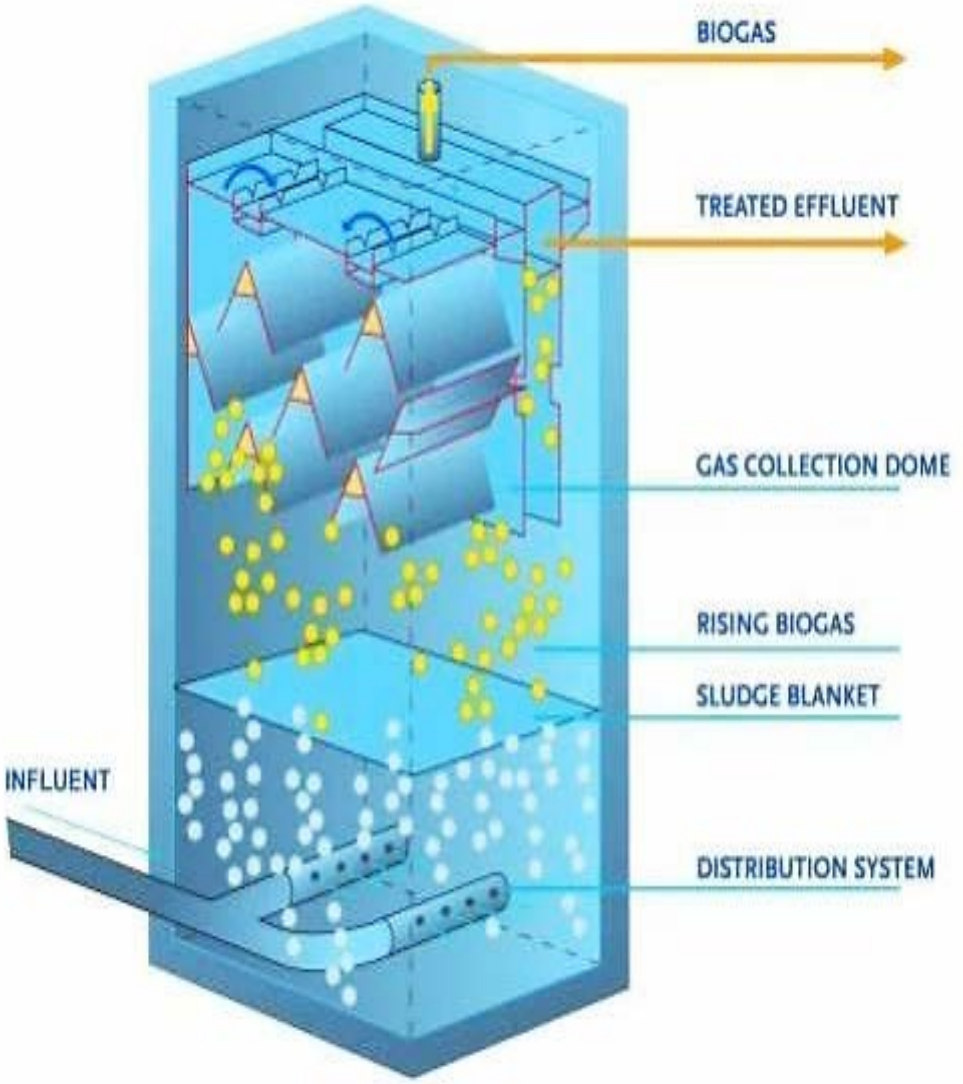
จากคุณสมบัติและลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี ทำให้สามารถแบ่งส่วนประกอบภายในถังยูเอเอสบีได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายพร้อมด้วยระบบกระจายน้ำเสียในบริเวณด้านล่างของถัง และส่วนตกตะกอนและแยกก๊าซบริเวณด้านบน โดยมีกลไกและลักษณะการทำงานของส่วนต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

1) ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะอยู่ทางด้านล่างของถัง

เป็นส่วนที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ การไหลของน้ำเสีย เป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน การกระจายน้ำเข้าถังจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดของถัง แบคทีเรียในถังยูเอเอสบีจะควบคุมให้มีความหนาแน่นและสะสมเป็นชั้นตะกอนในบริเวณด้านล่างของถัง เมื่อเริ่มเดินระบบแบคทีเรียในชั้นตะกอนที่อยู่กันอย่างหนาแน่นจะเกิดการรวมกันเป็นเม็ด โดยเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูงจะจมตัวอยู่ด้านล่าง มีการจัดเรียงตัวจากขนาดใหญ่ขึ้นไปหาเล็ก สะสมเป็นชั้นตะกอนอยู่ในบริเวณด้านล่างของถังส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วในการจมตัวต่ำจะฟุ้งขึ้นมาเป็นชั้นตะกอนแขวนลอย

2) ส่วนตกตะกอนและแยกก๊าซ

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมแบคทีเรียที่หลุดออกไปกับน้ำและทำหน้าที่แยกก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จึงมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกก๊าซ น้ำเสียและตะกอนแบคทีเรียไว้ด้านบนของถัง โดยการออกแบบขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปร่างของถังปฏิกิริยาโดยใช้หลักการออกแบบเดียวกัน คือ การแยกน้ำกับก๊าซ โดยอาศัยหลักการที่ว่ากระแสน้ำสามารถไหลวกกลับได้ ในขณะที่ก๊าซมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นเส้นตรงเท่านั้น ยกเว้นมีสิ่งกีดขวางหรือแผ่นปะทะใด ๆ มาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้น เมื่อผ่านพ้นสิ่งกีดขวาง จึงลอยตัวเป็นเส้นตรงดังเดิม จึงมีการออกแบบและติดตั้งแผ่นปะทะเพื่อขวางทิศทางการไหล ทำให้ก๊าซและน้ำมาปะทะแล้วเบี่ยงเบนการไหลของน้ำและก๊าซแยกออกจากกัน แยกตะกอนออกจากน้ำ โดยทำให้เกิดการตกตะกอนของแบคทีเรียที่ไหลขึ้นมากับน้ำ การตกตะกอนจะเกิดในส่วนบนสุดของถัง ซึ่งมีความปั่นป่วนของกระแสน้ำต่ำทำให้สามารถแยกน้ำและตะกอนได้โดยง่ายดังนั้น GSS จึงต้องมีพื้นที่ส่วนที่เป็นน้ำนิ่งเพียงพอที่ตะกอนจะตกกลับมายังถังปฏิกิริยา




**ภาพที่ 2.2** ลักษณะทั่วไปของระบบ UASB

**ที่มา :** กนกกาญจน์ กาญจนวัฒน์ (2552)

## 2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

### 2.6.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการทำงานของเอนไซม์เพิ่มขึ้น แบคทีเรียจึงมีความสามารถเติบโตได้เร็วขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกินกว่าที่แบคทีเรียทนได้ มีผลทำให้การทำงานของเซลล์แบคทีเรียเกิดความผิดปกติจากการที่โปรตีน กรดนิดคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียถูกทำลายจนไม่สามารถคืนสภาพได้ ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีอยู่ 2 ช่วง คือ

1) ช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophillic) อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส

2) ช่วงมีโซฟิลิค (Mesophillic) อุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ในช่วงเทอร์โมฟิลิค มีอัตราการบ่อยสลายรวดเร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิค แต่โดยทั่วไปในการบำบัดน้ำเสียจะควบคุมให้แบคทีเรียในระบบอยู่ในช่วงมีโซฟิลิค เนื่องจากในช่วงนี้ไม่ต้องใช้พลังงานสูง และพวกเทอร์โมฟิลิคจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่า ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าจะทำให้มีอุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูง เนื่องจากการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนอย่างมาก

### 2.6.2 พีเอชและสภาพความเป็นด่าง

พีเอช คือค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) หรือไฮโดรเนียมไอออน ($H3O^+$) ค่าพีเอชมีความสำคัญต่อการทำงานของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน โดยทั่วไปแบคทีเรียเจริญเติบโตดีที่ช่วงพีเอช 6.5 -7.8 ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน อาศัยการทำงานรวมกันของแบคทีเรียสองกลุ่มหลัก โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีความไวต่อพีเอชมากที่สุด (ไกรเวศ กาพย์ตุ้ม, 2555) แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ที่ช่วงค่าพีเอชหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียโดยทั่วไปช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมกับแบคทีเรียคือ 5 ถึง 10 แต่ก็มีแบคทีเรียที่มีความสามารถเจริญได้ในค่าพีเอชที่ต่ำกว่า 5 หรือค่าพีเอชที่สูงในช่วง 10 ถึง 11 โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1) Acidophiles คือ กลุ่มของแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ที่พีเอชต่ำกว่า 5 เช่น รา และแบคทีเรียบางชนิด

2) Alkaliphiles คือ กลุ่มของแบคทีเรียที่เจริญได้ในช่วงพีเอช 10 ถึง 11

ในน้ำเสียอุตสาหกรรมบางชนิดมีค่าพีเอชในน้ำเสียสูงกว่าช่วงค่าที่แบคทีเรียจะสามารถทำงานได้ ซึ่งส่งผลให้สภาพความเป็นด่างสูงตาม โดยส่วนใหญ่พีเอชที่สูงขึ้นและสภาพด่างเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากไอออน ไบคาร์บอเนต (HCO3-), คาร์บอเนต (CO32-) และไฮดรอกไซด์ (OH-) โดยส่วนใหญ่น้ำที่มีพีเอชสูงถึง 11 หรือมากกว่าจะมี OH- และ CO32- มากที่สุด พีเอชยิ่งสูงก็ยิ่งมี OH- มาก (Sawyer *et al*, 1994) เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายหรือการลำเลียงสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย ในทางตรงไอออนเหล่านี้สามารถเข้าทาปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ที่อยู่รอบ ๆ ยังผลให้เกิดความเสียหายต่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของเซลล์ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนสภาพโปรตีนของเยื่อหุ้มเซลล์ หรือการสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับโปรตีนหรือเอนไซม์บางชนิด จนทำให้การทำงานของโปรตีนหรือเอนไซม์นั้น ๆ ผิดปกติไป เป็นต้น ในทางอ้อมยังมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไอออไนเซชั่น (Ionization State) ในองค์ประกอบของสารอินทรีย์ การลำเลียงของสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์จะเกิดได้ดีกับไอออนที่ไม่แตกตัว พีเอชที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถในการนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ เกิดความเป็นพิษและยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรีย

**ตารางที่ 2.2** ผลของระดับพีเอชต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

| พีเอช | การทำงานของแบคทีเรีย |
|---|---|
| ต่ำกว่า 5.0 | แบคทีเรียถูกทำลายอาจตายได้ |
| 5.0 - 6.0 | แบคทีเรียเริ่มไม่ปลอดภัย |
| 6.0 - 6.5 | แบคทีเรียมีกิจกรรมลดลง |
| 6.5 - 8.0 | อยู่ในสภาวะปกติ มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงในการบำบัด |
| 8.0 - 8.5 | แบคทีเรียมีกิจกรรมลดลง |
| 8.5 - 9.0 | แบคทีเรียเริ่มไม่ปลอดภัย |
| สูงกว่า 9.0 | แบคทีเรียถูกทำลายอาจตายได้ |

**ที่มา :** สรัญญา คำภีระ (2556)

### 2.6.3 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์การตกตะกอนของจุลินทรีย์ และการเกิดก๊าซในระบบ กล่าวคือ หากระบบมีภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงเกินไป จะทำให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลง เนื่องจากเกิดการสร้างและสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มมากขึ้น และทำให้พีเอชในระบบลดลง โดยค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียของระบบยูเอเอสบี อยู่ในช่วง 12-20 กก.ซีโอดี/ ($ม^3$-วัน) (Metcalf, 2004) โดยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$OLR = CiQ/(V \times 1{,}000) \quad (1)$$

กำหนดให้ OLR = อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/($ม^3$-วัน)

Ci = ความเข้มข้นของค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด (มก./ล.)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย ($ม^3$/วัน)

V = ปริมาตรของถังปฏิกิริยา ($ม^3$)

**2.6.4 ระยะเวลาเก็บกักน้ำ**

ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) คือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำของระบบเป็นระยะเวลาที่แบคทีเรียสัมผัสกับน้ำเสีย การลดระยะเวลาเก็บกักน้ำจะทำให้ขนาดของถังปฏิกรณ์ลดลง แต่หากระยะเวลาเก็บกักน้ำต่ำเกินไป ตะกอนแบคทีเรียจะหลุดออกจากระบบได้มาก (wash out) ซึ่งมีผลให้ค่าอายุสลัดจ์ (Sludge retention time, SRT) ลดลงและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง อายุสลัดจ์ที่มีค่ามากจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงและหากค่าระยะเวลากักพักน้ำสั้น ๆ ก็จะเพิ่มความสามารถในการผลิตกรดได้ด้วย อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการที่จะลดระยะเวลาเก็บกักน้ำ คืออุณหภูมิ โดยช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมคือช่วง mesophillic เวลาที่ใช้ในการเก็บกักน้ำเสียโดยทั่วไปใช้เวลาเก็บกักในช่วง 4-24 ชั่วโมง ถ้าเป็นน้ำเสียที่ความสกปรกอยู่ในช่วงซีโอดี 1,000-3,000 มก./ล. ส่วนน้ำเสียที่ค่าความสกปรกสูงคือ ช่วง ซีโอดี 10,000-15,000 มก./ล. เวลาเก็บกักอาจมากกว่า 1 วัน

**2.6.5 สารอาหาร**

สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนได้แก่ ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P) , นิเกิล (Ni), โคบอลต์ (Co) เป็นต้น กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) อย่างน้อยเท่ากับ 100:1.1:0.2

**2.6.6 สารพิษ**

สารพิษ คือสารที่เมื่อมีความเข้มข้นถึงระดับหนึ่งจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบและทำให้ระบบล้มเหลวได้ คือแบคทีเรียจะสะสมไว้ภายในเซลล์จนก่อให้เกิดความเป็นพิษและตายในที่สุด สารพิษบางชนิดหากมีปริมาณความเข้มข้นที่พอเหมาะจะช่วยกระตุ้นให้แบคทีเรียทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ สารพิษเหล่านี้ได้แก่ กรดไขมันระเหยง่าย เกลืออนินทรีย์ โลหะหนัก แอมโมเนีย ซัลไฟด์ เป็นต้น ระดับความเป็นพิษของสารที่กล่าวแล้วข้างต้นจะมากหรือน้อยจะแตกต่างกันออกไป

1) กรดไขมันระเหยง่าย

กรดไขมันระเหยง่ายเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน เพราะการที่เกิดกรดไขมันระเหยเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พีเอชลดลง ซึ่งเป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย กรดระเหยง่ายที่ปริมาณความเข้มข้นสูงๆ จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียในถังหมักแบบไร้ออกซิเจน ทำให้แบคทีเรียเกิดเสียสมดุล พีเอชในระบบลดลง และทำให้ระบบล้มเหลวได้ แต่หากกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ภายในถังหมักสูงพอที่จะรักษาพีเอช ให้ใกล้เคียง 7 หรือเท่ากับ 7 ได้ กรดระเหยง่ายที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงถึง 10,000 มก./ล. ในรูปของกรดอะซิติกจะไม่เป็นพิษโดยตรงต่อแบคทีเรีย

2) เกลืออนินทรีย์

เกลืออนินทรีย์ที่เกิดจากเกลือของโลหะอัลคาไลน์ และอัลคาไลน์เอิร์ธ (ซึ่งเป็นโลหะที่ให้ไอออนบวก ได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) จะมีความเป็นพิษมากกว่าไอออนลบ และระดับเป็นพิษของไอออนบวกนั้นก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนวาเลนซ์และน้ำหนักอะตอมของโลหะ โดยโลหะที่มีวาเลนซ์ต่ำ เช่น แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งมีวาเลนซ์เท่ากับ 2 จะเป็นพิษมากกว่า ไอออนบวกอย่างเช่น โซเดียมและโพแทสเซียม ที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 ถึง 10 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ความเข้มข้นของเกลืออนินทรีย์ที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

| ไอออน | ความเข้มข้น (มก./ล.) | | |
|---|---|---|---|
| | กระตุ้น (stimulatory) | ยับยั้งปานกลาง (moderately inhibitory) | ยับยั้งอย่างรุนแรง (strongly inhibitory) |
| $Na^{+}$ | 100 - 200 | 3,500 - 5,500 | 8,000 |
| $K^{+}$ | 200 - 400 | 2,500 - 4,500 | 12,000 |
| $Ca^{2+}$ | 100 - 200 | 1,500 - 4,500 | 8,000 |
| $Mg^{2+}$ | 75 - 150 | 1,000 - 1,500 | 3,000 |

**ที่มา :** ดัดแปลงจาก วสวัตติ์ พิจอมบุตร (2556)

3) โลหะหนัก

โลหะหนักที่แตกตัวเป็นไอออนและอยู่ในรูปของสารละลายที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ได้แก่ สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) เป็นต้น โดยความเป็นพิษของโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักนั้น โลหะหนักที่ละลายน้ำได้น้อย ก็จะไม่เป็นพิษหรือมีความเป็นพิษน้อยต่อระบบ ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักให้เกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษ ดังนั้นหากมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงพอก็จะทำให้โลหะหนักตกตะกอนได้มาก นอกจากนั้นยังพบว่าโลหะหนักที่มีวาเลนซ์สูงจะเป็นพิษมากกว่าโลหะหนักที่มีวาเลนซ์ต่ำ โดยความเข้มข้นของไอออนโลหะที่มีผลต่อการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนแสดงดังตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่มีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

| ไอออน | ความเข้มข้น (มก./ล.) |
|---|---|
| $Zn^{2+}$ | 163 |
| $Cu^{2+}$ | 170 |
| $Cd^{2+}$ | 180 |
| $Cr^{6+}$ | 450 |
| $Cr^{3+}$ | 530 |
| $Hg^{2+}$ | 1,365 |
| $Fe^{2+}$ | 1,750 |

**ที่มา :** ดัดแปลงจาก ฤทธิชัย รัตนมุกดา (2552)

4) แอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ด้วย เช่น โปรตีน หรือยูเรีย เป็นต้น การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมีอยู่ 2 รูปคือแอมโมเนียมไอออน และก๊าซแอมโมเนีย ซึ่งจะอยู่ในรูปใดนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชภายในถังปฏิกิริยา ในกรณีที่พีเอชสูงกว่า 7.2 จะอยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนีย แต่ถ้าหาก พีเอชต่ากว่า 7.2 ก็จะอยู่ในรูปแอมโมเนียไอออน ซึ่งพบว่าก๊าซแอมโมเนียจะเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียไอออน (McCarty, 1964c) ถ้าก๊าซแอมโมเนียมีความเข้มข้นสูงถึง 150 มก./ล. จะมีความเป็นพิษอย่างรุนแรง ในขณะที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียไอออนจะต้องสูงถึง 3,000 มก./ล. ที่จะเป็นพิษเท่ากับก๊าซแอมโมเนีย ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่ส่งผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแสดงในตารางที่ 2.5

**ตารางที่** 2.5 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

| ความเข้มข้น (มก./ล.) | ผลต่อระบบ |
|---|---|
| 50-200 | ปริมาณที่เหมาะสม |
| 200-1,000 | ไม่เกิดผล |
| 1,500-3,000 | เริ่มยับยั้งการทำงานเมื่อพีเอชสูงขึ้น |
| มากกว่า 3,000 | เป็นพิษอย่างรุนแรง |

**ที่มา :** ดัดแปลงจาก วสวัตติ์ พิจอมบุตร (2556)

5) ซัลไฟด์

พิษของซัลไฟด์อ (sulfide toxicity) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะเกิดความเป็นพิษของซัลไฟด์ต่อแบคทีเรีย เมื่อน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณของซัลไฟด์มาก หรือเกิดการย่อยสลายพวกซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำเสีย หรือเกิดการย่อยสลายโปรตีน ซัลไฟด์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำ ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริคได้ แบคทีเรียสร้างกรดจะมีความไวต่อไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระสามารถทนต่อซัลไฟด์ที่ละลายน้ำซึ่งมีความเข้มข้น 50–100 มก./ล. แต่ถ้าความเข้มข้นมากกว่า 200 มก./ล. จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย การลดพิษของซัลไฟด์ ทำได้โดยการทำให้ตกตะกอนของซัลไฟด์ การทำให้น้ำเสียเจือจาง หรือโดยการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าระบบ

### 2.6.7 การกระจายน้ำเสียเข้าสู่ถัง

ระบบการกระจายน้ำเสียเข้าสู่ถังมีความสำคัญมากกับระบบยูเอเอสบี ดังนั้นจึงต้องมีการกระจายน้ำที่ดีเพื่อป้องกันการไหลลัดวงจรภายในถังปฏิกิริยาโดย Lettinga and Hulshoff (1992) ได้เสนอเกี่ยวกับเกณฑ์จำนวนจุดกระจายน้ำเสียต่อพื้นที่ดังตารางที่ 2.6 โดยสามารถใช้การป้อนน้ำเข้าได้ 2 วิธี ดังนี้

1) ป้อนน้ำเสียจากด้านบน และไหลเข้าถังด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง และสามารถตรวจสอบการอุดตันได้ง่าย

2) ป้อนน้ำเสียโดยใช้เครื่องสูบน้ำ ซึ่งเหมาะกับน้ำเสียประเภทสารละลายอินทรีย์

**ตารางที่ 2.6** จำนวนจุดกระจายน้ำที่ต้องการต่อพื้นที่ถังปฏิกิริยา

| ประเภทของสลัดจ์ | อัตราภาระบรรทุสารอินทรีย์เชิงพื้นที่ (กก. ซีโอดี/(ตร.ม.-วัน)) | ขนาดพื้นที่ต่อจุดกระจายน้ำ (ตร.ม.) |
|---|---|---|
| สลัดจ์ฟล็อกความหนาแน่นมากกว่า 40 กก.ทีเอสเอส/ลบ.ม. | <1.0 | 0.5-1 |
| | 1-2 | 1-2 |
| | >2 | 2-3 |
| สลัดจ์ฟล็อกความหนาแน่น 20 ถึง 40 กก.ทีเอสเอส/ลบ.ม. | <1-2 | 1-2 |
| | >3 | 2-5 |
| ตะกอนเม็ด | 1-2 | 0.5-1 |
| | 2-4 | 0.5-2 |
| | >4 | >2 |

**ที่มา :** ไกรเวศ กาพย์ตุ้ม (2555)

**2.6.8 ความเร็วของของเหลวที่ไหลขึ้น (liquid upflow velocity)**

ความเร็วที่ไหลขึ้นมีผลต่อการขยับขึ้นลงของชั้นตะกอน รวมทั้งช่วยระบายก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 โดย Lettinga and Hulshoff (1991) ได้แนะนำค่าความเร็วที่ไหลขึ้น (ศิรินารถ บุญอาษา, 2554) ดังตารางที่ 2.7

$$V = H/t \qquad (2)$$

กำหนดให้ v = ความเร็วน้ำไหลขึ้น, ม./ชม.;
H = ความสูงถังปฏิกรณ์, ม.;
t = ระยะเวลาเก็บกักน้ำ, ชม.

**ตารางที่ 2.7** ค่าแนะนำความเร็วที่ไหลขึ้นของระบบยูเอเอสบี

| ประเภทน้ำเสีย | ความเร็วน้ำไหลขึ้น (เมตร/ชั่วโมง) | |
|---|---|---|
| | ช่วงค่า | ค่าที่แนะนำ |
| ซีโอดีเกือบทั้งหมดเป็นสารละลาย | 1.00 - 3.00 | 1.5 |
| ซีโอดีบางส่วนเป็นสารละลาย | 1.00 - 1.25 | 1.0 |
| น้ำเสียชุมชน | 0.8 - 1.00 | 0.7 |

**ที่มา :** ไกรเวศ กาพย์ตุ้ม (2555)

### 2.6.9 ความเร็วการตกตะกอนของตะกอนเม็ด

ความเร็วการตกตะกอนควรมีค่ามาก เพื่อไม่ให้ตะกอนออกไปกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยขนาด และความหนาแน่นของตะกอนเม็ดมีผลต่อการตกตะกอน Lettinga *et al*. (1980) เสนอว่า ความเร็วในการจมตัวของตะกอนเม็ดที่ดีควรมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 90 ม./ชม. Bhatti *et al*. (1995) ศึกษา พบว่าตะกอนเม็ดขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร มีความเร็วในการตกตะกอนประมาณ 58 ม./ชม.

## 2.7 จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบ UASB

จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี มีดังต่อไปนี้

1) จัดเป็นระบบที่สามารถรับอัตรารองรับภาระสารอินทรีย์สูง (High rate anaerobic digestion) โดยสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากถึง 20kg COD/$m^3$/d

2) เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวกลางจึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถัง และเม็ดตะกอนจะมีอัตราส่วนของจุลินทรีย์ต่อปริมาตรสูง ดังนั้นถังปฏิกรณ์จึงมีขนาดเล็ก รวมทั้งมีระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียสั้นกว่าระบบอื่น

3) ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุตัวกลาง อุปกรณ์ในการกวนผสมและถังตกตะกอนทำให้ค่าก่อสร้างถังปฏิกรณ์ถูกลง

4) เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำ น้ำเสียที่สารอินทรีย์ย่อยสลายง่าย เช่น น้ำเสียจากโรงงานเบียร์ น้ำหวาน เป็นต้น

## 2.8 ข้อจำกัดและอุปสรรคของถังปฏิกรณ์แบบ UASB

### 2.8.1 ข้อจำกัดและอุปสรรคของถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี มีดังต่อไปนี้

1) ใช้ระยะเวลานานในการเริ่มต้นระบบ (Startup) เนื่องจากต้องสร้างเม็ดตะกอน และชั้นสลัดจ์ก่อน โดยจะต้องทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ถัง UASB ให้มีความเข้มข้นประมาณ 40-100 kg VSS/$m^3$ และรักษาสภาวะที่เอื้อให้เกิดการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จึงเป็นเรื่องยากและมีความซับซ้อน

2) การควบคุมดูแลระบบยุ่งยาก เนื่องจากต้องพยายามรักษาตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้เหมาะสม และไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบ (Wash Out) รวมทั้งปัญหา Mass transfer resistance และหากเกิดสภาวะ Shock load อาจจะมีปัญหาในการลอยตัวของเม็ดตะกอน และถ้าดำเนินการไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ

3) ต้องการบุคลากรที่มีทักษะการควบคุมดูแลระบบสูง

**2.8.2 ข้อแนะนำ**

1) อาจจะต้องมีขั้นตอนปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ (Pretreatment) ถ้าน้ำเสียของแข็งแขวนลอยสูง (High suspended solid content) โดยทั่วไปค่าของแข็งแขวนลอยที่เข้าระบบ UASB ควรน้อยกว่า 1,500 mg/l

2) โดยทั่วไปอาจจะมีการทำเป็นระบบแบบสองขั้นตอน โดยมีการแยกให้มีบ่อหรือถังหมักกรด (Acid tank) ก่อนแล้วจึงป้อนเข้าสู่ถัง UASB เพื่อผลิตก๊าซมีเทน

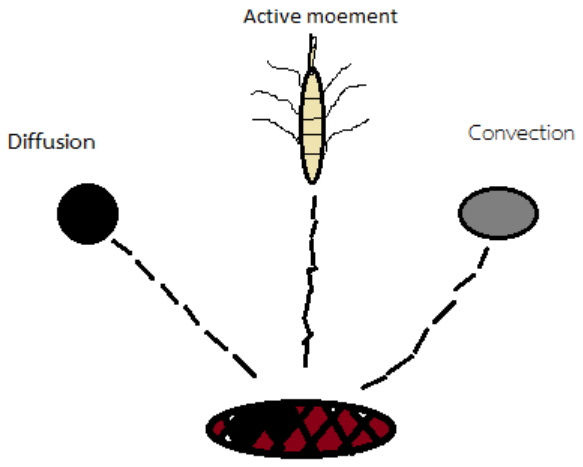
## 2.9 การเกิดเม็ดตะกอนในระบบ UASB

### 2.9.1 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอน

ขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอน Schmidt และ Ahring (1995) อธิบายไว้ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** Transport การเคลื่อนไหวของเซลล์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ไปจับตัวกับอนุภาคเฉื่อย หรือเซลล์แบคทีเรียอื่น กลายเป็นอนุภาคพื้นฐาน (Substratum) ด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การแพร่กระจาย (Brownian Motion) การพัดพา (Convective) โดยของเหลว ก๊าซ การตกตะกอน หรือการเคลื่อนไหวของเซลล์โดยแฟลกเจลลา แสดงดังภาพที่ 2.3

**ขั้นตอนที่ 2** Reversible Adsorption การดูดติดของเซลล์แบคทีเรียกับอนุภาคพื้นฐาน ซึ่งอาจเป็นกลุ่มแบคทีเรียหรืออนุภาคของแข็งเฉื่อย การดูดติดนี้เป็นผลมาจากแรงทางประจุไฟฟ้า (Ionic strength) ซึ่งสามารถเกิดการแยกตัวหรือหลุดออกไปได้อีกครั้ง




**ภาพที่** 2.3 กลไกการเคลื่อนไหวต่าง ๆ ที่มีผลต่อการรวมตัวกันของเซลล์แบคทีเรีย

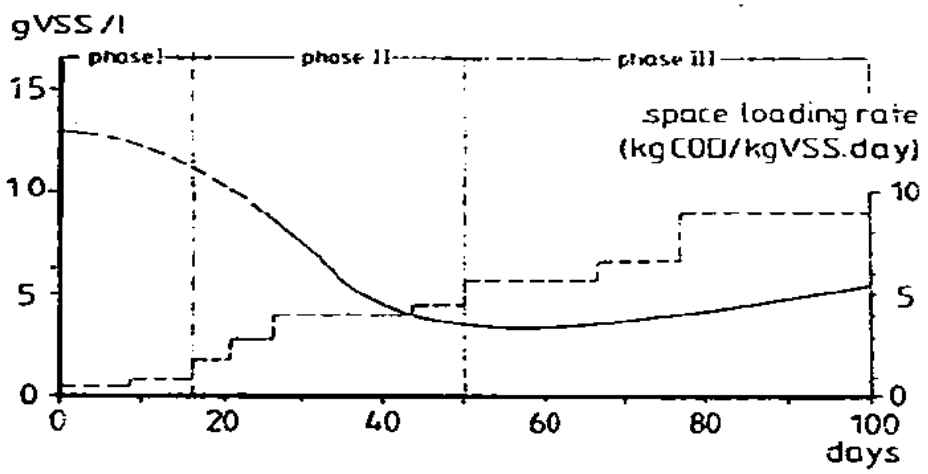
**ที่มา :** ดัดแปลงจาก Schmidt and Ahring (1995)

**ขั้นตอนที่ 3** Irreversible Adhesion ด้วยพันธะแข็งแรงของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียสร้างขึ้นตามธรรมชาติแล้วขับออกมานอกเซลล์ (Extra Cellular Polymers, ECP) ทำให้เกิดการเกาะยึดของเซลล์เข้ากับอนุภาคพื้นฐาน เกิดการรวมตัวเพื่อให้เซลล์มีขนาดใหญ่ โอกาสที่เซลล์จะหลุดออกจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์นั้นยากมากขึ้น

**ขั้นตอนที่ 4** Multiplication การแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียในชั้น ECP โดยเซลล์ที่แบ่งตัวใหม่ยังคงถูกกักอยู่ในชั้น ECP และเกิดการเพิ่มขนาดของเม็ดตะกอน นอกจากนี้ยังเกิดการดักเซลล์ใหม่ที่อยู่ในน้ำเสียเข้ามาจับตัวในเม็ดตะกอนอีกด้วย ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เข้าสู่สภาวะคงตัว แบคทีเรียจะเจริญเติบโตเต็มที่และเป็นตะกอนเม็ดที่สมบูรณ์

### 2.9.2 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ทิพาวรรณ รักสงบ (2552); Hulshoff Pol et al, (1983) ได้ศึกษาการเกิดเม็ดตะกอน โดยสังเกตจากพฤติกรรมในการคงอยู่หรือหลุดออกของตะกอน แสดงดังภาพที่ 2.4 และได้กล่าวถึงขั้นตอนของการเกิดเม็ดตะกอน 3 ขั้นตอน ดังภาพที่




**ภาพที่ 2.4** แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนแบคทีเรียและภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ระหว่างขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนในถังปฏิกิริยายูเอเอสบี

**ที่มา :** Hulshoff Pol et al, (1983); ทิพาวรรณ รักสงบ (2552)

**ขั้นตอนที่ 1** Washout Stage (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 2 กก.ซีโอดี/( ม3.-วัน) ขั้นตอนนี้เป็นช่วงเริ่มต้นระบบ เมื่อทาการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยาแล้ว น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตะกอน ทำให้ชั้นตะกอนล่างเกิดการขยายตัวและเกิดก๊าซขึ้นในระบบ ทำให้เกิดแบคทีเรียจำพวกเส้นใย (Filamentous Bacterium) ซึ่งส่งผลให้ตะกอนจมตัวได้น้อยลง แบคทีเรียที่เป็นตะกอนเบาจะไหลออกกับน้ำล้นตลอดเวลา ขณะที่มีการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียในระบบอย่างช้า ๆ

**ขั้นตอนที่ 2** Transition Stage (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2-5 กก.ซีโอดี/(ม$^3$-วัน) ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงมาก เนื่องจากการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทำให้เกิดก๊าซมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหลุดออกของตะกอนขนาดเล็ก ๆ ออกนอกถัง ส่วนตะกอนที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจะคงอยู่ในระบบและรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งถือได้ว่าขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกพันธุ์แบคทีเรียในระบบ ในช่วงนี้มีข้อควรระวัง คือ ไม่ควรให้มีการสูญเสียตะกอนมากกว่าการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียชนิดเม็ด เพราะอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้

**ขั้นตอนที่ 3** Progressive Granular Stage (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 3-5 กก.ซีโอดี/( ม3.-วัน) ขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่มีการเพิ่มขนาดและจำนวนของแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังปฏิกิริยา โดยอัตราการเกิดเม็ดตะกอนจะมีมากกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบ เม็ดตะกอนที่เกิดในระยะแรกประกอบด้วย กลุ่มตะกอนขนาดใหญ่จับตัวกันอยู่อย่างหลวม ๆ และค่อย ๆ อัดตัวแน่นเข้า และเมื่อระบบผ่านขั้นตอนนี้ไปแล้วระบบจะสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ระบบจะสามารถรับได้ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาอาจรับได้ถึง 50 กก.ซีโอดี/( ม3-วัน)

**2.9.3 แบบจำลองในกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนของระบบยูเอเอสบี (Liu *et al*, 2003) มีดังนี้**

**1) การเคลื่อนย้ายทางฟิสิกส์** ทำให้มีการชนกัน สัมผัสระหว่างแบคทีเรียหรือ การดึงดูดของแบคทีเรียบนผิวนิวคลิไอ (nuclei) แรงที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

(1) แรงดันของน้ำ (hydraulic force)

(2) แรงจากการแพร่ (diffusion force)

(3) แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) ; ดังแสดงในภาพที่ 2.5

**2) แรงดึงดูด** ทำให้รักษาเสถียรภาพและเซลล์สัมผัสกัน แรงที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

(1) แรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามกัน

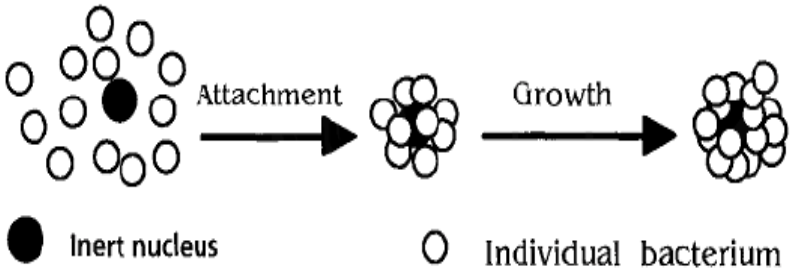
(2) แรงตึงผิว (hydrophobicityและvan der walls forces); ดังแสดงในภาพที่ 2.6

**3) แรงที่ทำให้เกิดการรวมตัวใหญ่ขึ้นเต็มที่** (microbial force) ได้แก่

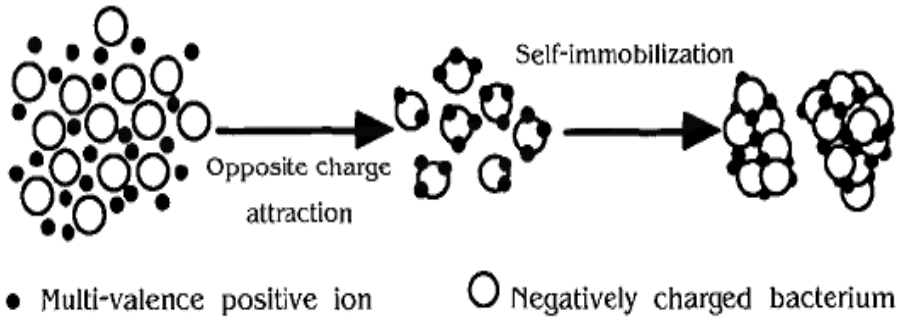
(1) ผลผลิต Extracellular Polymer โดยแบคทีเรีย เช่น Exopolysaccharides

(2) การเติบโตจากการรวมตัวของเซลล์

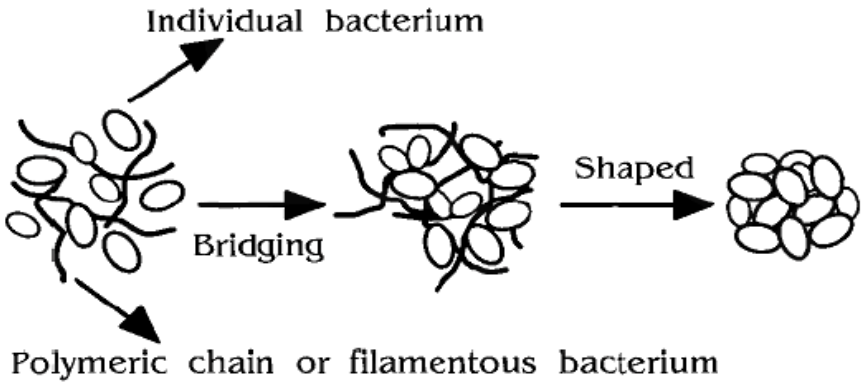
(3) การเปลี่ยนแปลง Metabolic และความสามารถทางพันธุกรรมที่ลดลงโดยสิ่งแวดล้อมซึ่งทำให้เซลล์มีปฏิสัมพันธ์กันสะดวกขึ้นและเป็นผลให้โครงสร้าง Microbial เรียงตัวกันสูง ดังแสดงในภาพที่ 2.7




**ภาพที่** 2.5 การเกิดตะกอนเม็ดแบบ inert nuclei model
ที่มา : Liu *et al*, (2003); วสวัตติ์ พิจอมบุตร (2556)




**ภาพที่ 2.6** การเกิดตะกอนเม็ดแบบ multi-valence positive ion-bonding model
**ที่มา :** Liu *et al*, (2003); วสวัตติ์ พิจอมบุตร (2556)




**ภาพที่ 2.7** การเกิดตะกอนเม็ดแบบ polymer or filament bonding model
**ที่มา :** Liu *et al*, (2003); วสวัตติ์ พิจอมบุตร (2556)

**2.9.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างเม็ดตะกอน** (Hulshoff Pol *et al*, 1983)

**1) เงื่อนไขของสภาพแวดล้อม**

(1) สารอาหาร ต้องอยู่ในรูปที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailability)

(2) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้การทำงานของแบคทีเรียสูงขึ้น (ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม)

(3) ค่าพีเอช ช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบคือ 6.5-7.8

(4) ลักษณะการไหลของน้ำเสียจะต้องเป็นแบบ Plug Flow เพราะหากเป็นแบบ Completely mixed จะทำให้ค่าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ

(5) ชนิดของน้ำเสีย ส่วนประกอบของน้ำเสีย อิออนบวก และสารพิษซึ่งยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

**2) ชนิดของตะกอนเริ่มต้น** (Seed Sludge)

**3) สภาวะเงื่อนไขของระบบในช่วงเริ่มต้นระบบ** เช่น

(1) ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ระบบที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงจะเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ดี

(2) ปริมาณตะกอนเริ่มต้น ที่นำมาเติมในระบบ จะต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม

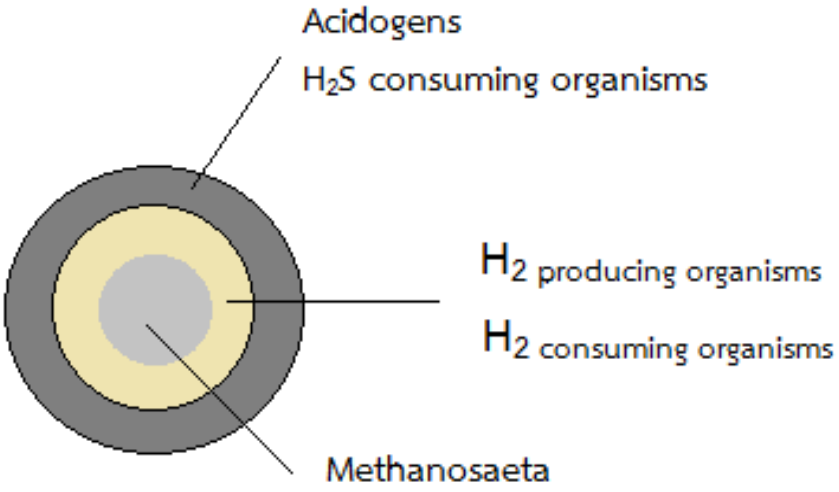
**2.9.5 ลักษณะของตะกอนเม็ด**

McLeod *et al.* (1990) ระบุว่าโครงสร้างตะกอนเม็ดประกอบด้วย 3 ชั้น คือดังแสดงในภาพที่ 2.8

1) แกนกลาง คือ Methanothrix-Like Cell

2) ชั้นกลาง ประกอบด้วย Methanothrix ชนิดที่เป็นท่อนสั้นๆ (rod) และ $H_2$-Consuming Organisms

3) ชั้นนอกสุด ประกอบไปด้วย Rod และ Filamentous Microorganisms




**ภาพที่** 2.8 องค์ประกอบของตะกอนเม็ด
**ที่มา :** ดัดแปลงจาก ไกรเวศ กาพย์ตุ้ม (2555)

ลักษณะของตะกอนเม็ดขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ (seed sludge) องค์ประกอบในน้ำเสีย การเริ่มต้นระบบ และสภาวะแวดล้อมในการทดลอง สามารถแบ่งลักษณะของตะกอนเม็ดได้เป็น 4 ลักษณะดังนี้

1) Sorcina Granular มีรูปร่างกลม ขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร โดยส่วนใหญ่เกาะกันเป็นกลุ่ม ตะกอนเม็ดนี้สร้างมาจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกมากกว่า 1,000 มก./ล.

2) Spinky Granular มีความยาวมากกว่า 1 มิลลิเมตร ความหนาน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 60 ส่วนใหญ่ตะกอนเม็ดนี้สร้างมาจากน้ำเสียของโรงงานแป้งข้าวโพด

3) Filamentous มีรูปร่างเป็นแท่งต่อกันเป็นสาย จาก Methanothrix ชนิดที่เป็นเส้น ตะกอนเม็ดนี้สร้างมาจากน้ำเสียที่มีแต่กรดไขมันระเหยง่าย

4) Rod รูปร่างเป็นท่อนสั้น ๆ ประกอบด้วย Methanothrix ตะกอนเม็ดนี้ส่วนใหญ่สร้างมาจากน้ำเสียโรงงานแป้งมัน และโรงงานน้ำตาล

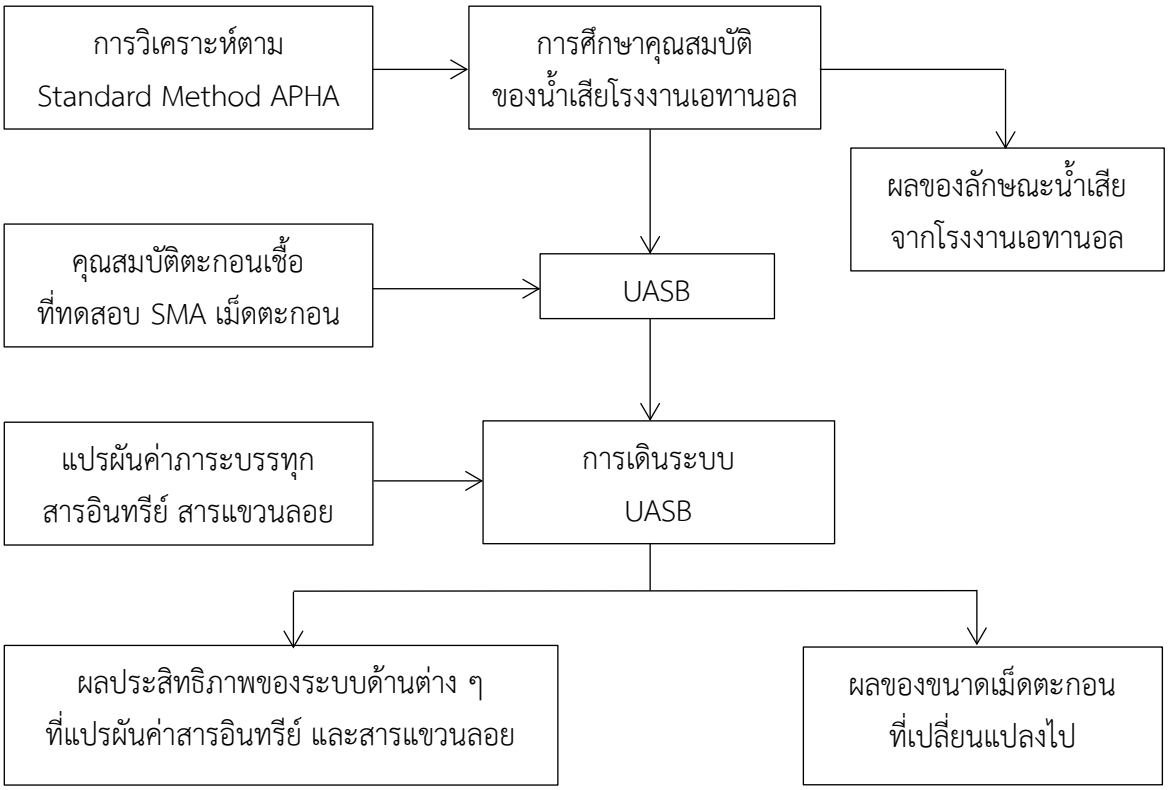
ลักษณะที่ดีของตะกอนเม็ดในระบบยูเอเอสบีควรมีลักษณะกลม มีความหนาแน่นสูง จมตัวได้ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือน และควรมีขนาดตั้งแต่ 0.5 ถึง 5.0 มิลลิเมตร โดยตะกอนเม็ดนี้คือกลุ่มแบคทีเรียที่รวมตัวกัน จึงมีสารที่ถูกปล่อยออกจากเซลล์แบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นพวกคาร์โบไฮเดรต แต่มีกรดนิวคลีอิกต่ำ (ไกรเวศ กาพย์ตุ้ม, 2555)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ อมรรัตน์ บุญมี (2549) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยระบบยูเอเอสบี โดยใช้ถังปฏิกิริยายูเอเอสบีขนาด 5 ลิตร จำนวน 2 ถัง เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากถังย่อยตะกอนแบบไร้อากาศ และมีค่าอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ตั้งแต่ 0.5-5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน สำหรับน้ำเสียที่ใช้ทดลองถูกเจือจาง ด้วยน้ำประปาในอัตราส่วน 1:1 และ 1:9 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อัตราการรับภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังปฏิกิริยาที่ 1(1:1) และ 2(1:9) เท่ากับ ร้อยละ 80 และ 52 ตามลำดับ ส่วนที่อัตราการรับภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน ถังปฏิกิริยาที่ 2 (1:9) มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเป็นร้อยละ หลังจากนั้นเปลี่ยนอัตราส่วนการเจือจางน้ำเสียของถังปฏิกิริยาที่ 1 จาก 1:1 เป็น 1:9 และถังปฏิกิริยาที่ 2 จาก 1:9 เป็นความเข้มข้นจริง พบว่าที่อัตราการรับภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน ประสิทธิภาพการบำบัดซี โอดีเท่ากับร้อยละ 30.8 ส่วนที่อัตราการรับภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน ถังปฏิกิริยาที่ 2 (ร้อยละ 100) มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเป็นร้อยละ 71.7 ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ ปิยพงศ์ สุวรรณศรี (2553) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาล โดยระบบยูเอเอสบี 2 เฟส 2 สเตจ โดยนำน้ำเสียจริงจากโรงกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาลมาเจือจางด้วยน้ำประปา ไม่มีการเติมสารปรับสภาพด่างและสารอาหารอื่น ๆ เพิ่มเติม ป้อนเข้าระบบซึ่งไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ในการทดลองประกอบด้วยถังปฏิกรณ์หมักกรดปริมาตร 5.4 ลิตร 1 ถัง และถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีปริมาตร 8.2 ลิตร จำนวน 2 ถัง ป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลคงที่ที่ 4.6 ลิตรต่อวัน ตะกอนเชื้อที่ใช้ในระบบยูเอเอสบีเป็นตะกอนเม็ดจากระบบยูเอเอสบีของโรงงานเบียร์ จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วงการทดลอง โดยช่วงที่ 1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ ทดลอง 139 วัน ที่ความเข้มข้นซีโอดีน้ำเข้าระบบ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีรวม ร้อยละ 82 น้ำออกมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ย 539 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของกรดอะซิติก อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างทั้งหมด คือ 0.4 ร้อยละก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 64 ในการทดลองที่ 2 ป้อนน้ำเสียที่ความเข้มข้นของซีโอดีน้ำเข้าที่ 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายสูงสุด 10,250 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของกรดอะซิติก อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันต่อสภาพด่างทั้งหมดเพิ่มขึ้นถึง 1.58 ทำให้ระบบไม่สามารถรักษาสมดุลพีเอชไว้ได้

จากงานวิจัยของ ฤทธิชัย รัตนมุกดา (2552) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเอทานอลด้วยระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนโดยพิจารณาผลของภาระสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของระบบ มีการใช้ถังสร้างกรดชนิดกวนผสมสมบูรณ์ ขนาด 1.7 ลิตร ต่ออนุกรมกับถังปฏิกิริยายูเอเอสบีขนาด 10 ลิตร มีระยะเวลาการกักเก็บ 12 ชม. และ 2.8 วัน ใช้ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 12,532 , 23,453 , 33,653 และ 39,015 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 3.8, 7.0, 10.0, และ 11.7 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร/วัน จากการทดลองพบว่าระบบจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่ภาระสารอินทรีย์ไม่เกิน 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร.วัน ซึ่งมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายในระบบจะอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จากนั้นเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์มากขึ้น ประสิทธิภาพของระบบมีแนวโน้มลดลง

จากงานวิจัยของ สุนันท์ พูลธนกิจ (2547) ได้ทำการศึกษาการบำบัดนำกากส่าของโรงงานสุราองค์กรสุรา โดยกระบวนการยูเอเอสบี โดยได้ทำการถังปฏิกิริยา 1 ถัง ปริมาตร 0.283 ลูกบาศก์เมตร นำตะกอนเชื้อใส่ที่ 150 ลิตร โดยนำน้ำกากส่าจากบ่อปรับสภาพครั้งนี้มีค่าพีเอชอยู่ที่ 4.1-4.6 และค่าความเข้มข้นซีโอดีอยู่ที่ 150,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ทำการศึกษาที่ระยะเวลากักเก็บ 3 ค่าด้วยกันคือ 1.09, 3.93, และ 13.10 วัน ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลากับเก็บดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 33, 37 และ 35 ตามลำดับ และมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.6, 1.4 และ 3.5 ลิตรต่อปริมาตรน้ำกากส่า 1 ลิตร ตามลำดับ

## 2.11 กรอบแนวคิดในการวิจัย