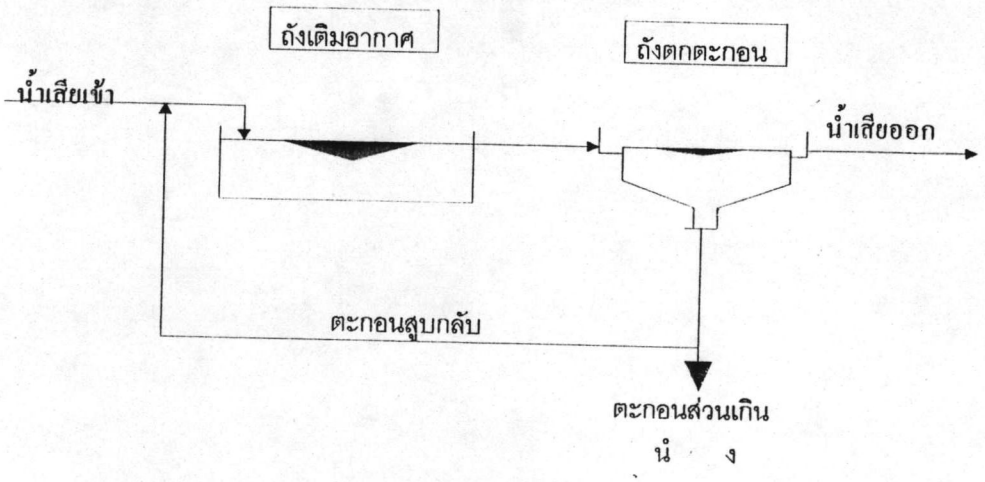
บทที่ 3

ทฤษฎีกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวตเตดสลัดจ์

3.1 แนะนำกระบวนการ

กระบวนการแอกติเวตเตดสลัดจ์ (Activated sludge process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมีแบบใช้อากาศซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน และสารไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย การทำงานของกระบวนการประกอบด้วยการให้ออกซิเจนแก่น้ำเสียและกวนให้สัมผัสกับตะกอนจุลินทรีย์ (Biological-floc) ในถังเติมอากาศ เพื่อใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ในน้ำเสียและเปลี่ยนมาเป็นมวลจุลินทรีย์ จากนั้นน้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วและตะกอนจุลินทรีย์จะไหลไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำใสส่วนบนทิ้งออกจากระบบส่วนตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งจมอยู่ที่ก้นถังนั้น ส่วนใหญ่จะถูกสูบกลับไปเข้าถังเติมอากาศ และตะกอนอีกส่วนหนึ่งจะถูกระบายทิ้งออกจากระบบ ทั้งนี้เพื่อรักษาอายุตะกอน แผนผังของระบบแอตติเวตเตดสลัดจ์แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของกระบวนการแอกติเวตเตดสลัดจ์

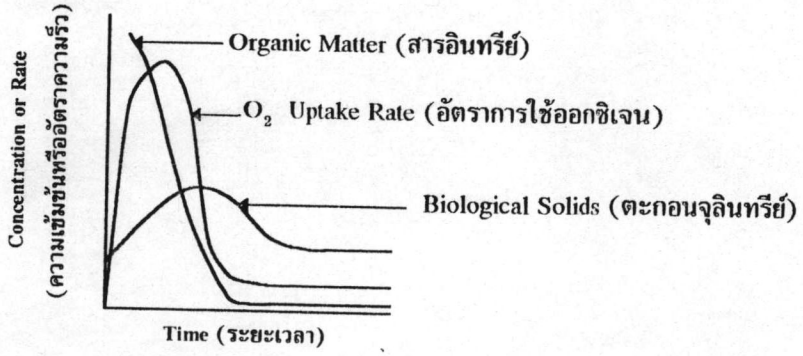
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 กลไกในการทำงาน

กระบวนการแอกติเวตเตดสลัดจ์ ประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากมายหลายชนิดที่ถูกควบคุมให้เจริญเติบโตอยู่ในน้ำ ซึ่งมีออกซิเจนอิสระละลายอยู่และจะต้องมีสารอินทรีย์ที่สามารถใช้เป็นอาหารและแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิตได้อีกด้วย ปฏิกิริยาทางชีวเคมีของกระบวนการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{มลสารอินทรีย์} + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow{\text{จุลินทรีย์}} \text{จุลินทรีย์ตัวใหม่} + \text{คาร์บอนไดออกไซด์} + \text{น้ำ} + \text{พลังงาน}$$

มลสาร (Pollutants) ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารและเจริญเติบโตขยายพันธุ์ต่อไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแยกออกสู่บรรยากาศ ส่วนน้ำจะผสมออกไปกับน้ำที่บำบัดแล้ว พลังงานก็จะถูกจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตสรุปแล้วมลสารซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ สารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนมาเป็นมวลจุลินทรีย์ที่หนักกว่าน้ำสามารถแยกออกได้ง่ายด้วยการตกตะกอนในถังตกตะกอน น้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์นำสารอินทรีย์ต่าง ๆ มาใช้จนหมดก็จะเป็นน้ำที่สะอาดพอที่จะปล่อยทิ้งได้โดยไม่เกิดการเน่าเหม็น ในการใช้สารอาหารหรือในการย่อยสลาย (Break down) สารอินทรีย์ของจุลินทรีย์อาจจะมีการทำงานร่วมกันหลายชนิดก็ได้ โดยจุลินทรีย์บางชนิดเริ่มทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน(Complex organics)ก่อน จากนั้นก็จะมีจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ย่อยสลายส่วนที่เหลือหรือมิฉะนั้นก็อาจจะเป็นการนำเอาผลหรือของเสีย ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดอื่นมาทำการย่อยสลายต่อจนเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยได้อีกต่อไป (End products) ลักษณะของการเปลี่ยนแปลง ต่าง ๆ ในการทำงานของกระบวนการแบบทำงานเป็นครั้ง (Batch-process) สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบไม่ต่อเนื่อง

เมื่อเริ่มการทำงาน ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะมีค่าสูงส่วนจุลินทรีย์จะมีค่าความเข้มข้นต่ำและมีอัตราการใช้ออกซิเจนต่ำ ต่อจากนั้นเมื่อจุลินทรีย์เริ่มทำการย่อยสลาย สารอินทรีย์ก็จะเริ่มใช้ออกซิเจนมากขึ้นและเจริญเติบโตเป็นผลให้มีจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ครั้นเมื่ออาหารเริ่มขาดแคลนจนไม่เพียงพอในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ปริมาณจุลินทรีย์ และอัตราความต้องการออกซิเจนก็จะลดลงตามลำดับ แต่สำหรับในระบบบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีน้ำไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง จุลินทรีย์ก็จะย่อยสลายสารอินทรีย์และเพิ่มปริมาณอยู่ตลอดเวลา และมีอัตราการใช้ออกซิเจนสูงตลอดเวลาเช่นเดียวกัน

จุลินทรีย์ต้องนำออกซิเจนมาใช้ด้วยเหตุผล 3 ประการคือ

1. ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานตามสมการ

$$\text{สารอินทรีย์} + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow[\text{เอนไซม์}]{\text{จุลินทรีย์}} CO_2 + \text{น้ำ} + \text{พลังงาน} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

2. ใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ตามสมการ

$$\text{สารอินทรีย์} + P + N + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow[\text{พลังงาน}]{\text{จุลินทรีย์}} \text{เซลล์ใหม่} + CO_2 + \text{น้ำ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

โดยพลังงานที่ได้จากสมการที่ (1) จะถูกจุลินทรีย์นำมาใช้ในสมการที่ (2) เพื่อสร้างเซลล์ใหม่

3. ใช้ในการย่อยสลายจุลินทรีย์ตัวอื่นที่ตายแล้ว ตามสมการ

$$\text{จุลินทรีย์ที่ตายแล้ว} + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow[\text{พลังงาน}]{\text{จุลินทรีย์}} CO_2 + \text{น้ำ} + (NH_3 \text{หรือ } NO_3) + \text{พลังงาน} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

โดยจุลินทรีย์ที่ตายแล้วจะถูกใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ตัวอื่น ๆ ที่ยังมีชีวิตอยู่

3.3 การเกิดแอกติเวตเตดสลัดจ์

การเกิดแอกติเวตเตดสลัดจ์ มีขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอน ซึ่งทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นภายในถังเติมอากาศ คือ (สุรพล,2536)

1. ขั้นส่งถ่าย (Transfer step)

ขั้นแรกแบคทีเรียในถังเติมอากาศ จะดูดสารอินทรีย์ในน้ำเสียมาไว้ที่ผนังเซลล์ และส่งเอ็นไซม์ที่มีความเหมาะสมกับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำเสียออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลให้เล็กลงพอที่จะซึมผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ได้ โดยขั้นตอนนี้จะกินเวลาประมาณ 15-30 นาที เพื่อให้แบคทีเรียมีเวลาสัมผัสกับน้ำเสียได้เพียงพอและทั่วถึง

2. ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion step)

เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกย่อย และดูดซึมเข้าสู่ภายในเซลล์แล้ว แบคทีเรียจะเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ที่อยู่ภายในเซลล์ด้วยกระบวนการออกซิเดชั่น (Oxidation) ซึ่งในขั้นนี้แบคทีเรียต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในการกระบวนการ และจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ พลังงานและสร้างเซลล์ใหม่ ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis) กระบวนการทั้งสองนี้เป็นกระบวนการ ทางเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ของแบคทีเรีย (Metabolic process)

3. ขั้นรวมตะกอน (Flocculation step)

เมื่อแบคทีเรียได้ใช้สารอินทรีย์ในขั้นที่สองไปบางส่วน จนเหลือสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นอาหารจำกัด แบคทีเรียจะมีพลังงานลดลงขณะเดียวกันแบคทีเรียจะถูกการกวนผสมในถังเติมอากาศ ทำให้เซลล์ของมันชนกันและจับตัวรวมกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟลอค (floc) ซึ่งมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีกว่าเซลล์เดี่ยว ๆ ทำให้แบคทีเรียในขั้นนี้สามารถแยกตัวออกจากน้ำที่กำจัดแล้วได้ง่าย

3.4 จุลชีววิทยาของแอกติเวตเตดสลัดจ์

จุลินทรีย์ที่มีในระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ สามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ได้ดังนี้

1. จุลินทรีย์สร้างฟลอค (Floc forming microorganisms) เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญมากในระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ เพราะเป็นจุลินทรีย์หลักที่ใช้ในการกำจัดน้ำเสียและสามารถจับตัวรวมกัน เป็นกลุ่มก้อนแยกตัวออกจากน้ำที่บำบัดแล้วได้ง่าย เรียกว่า "ฟลอค" จุลินทรีย์ประเภทนี้ส่วนใหญ่ได้แก่ แบคทีเรีย และโปรโตซัว ฟังไจบางชนิด

2. แซฟโปรไฟท์ (Saprophytes) เป็นจุลินทรีย์ที่รับผิดชอบต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรีย ซึ่งมักเป็นพวกสร้างฟลอคแซฟโปรไฟท์สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิดคือ

- แซฟโปรไฟท์แบบปฐมภูมิ (Primary) ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอาหาร(Substrate) ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก
- แซฟโปรไฟท์แบบทุติยภูมิ (Secondary) ทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก ที่สร้างโดยแซฟโปรไฟท์แบบปฐมภูมิให้สมบูรณ์และได้ผลสุดท้ายของปฏิกิริยาคือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

3. จุลินทรีย์ทำลาย (Predator) เป็นจุลินทรีย์ที่กินจุลชีพด้วยกันเองเป็นอาหาร ซึ่งจุลินทรีย์ชนิดนี้มีขนาดใหญ่กว่าหรือมีศักยภาพที่สูงกว่าจะกินจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก ทำให้จุลินทรีย์ทำลายมีความสำคัญกับระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ กล่าวคือช่วยทำให้น้ำออกจากระบบบำบัดใส

4. จุลินทรีย์ก่อกวน (Nuisance microorganisms) เป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดปัญหาในการทำงาน ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ เป็นแบคทีเรียชนิดที่เป็นเส้นใยหรือฟังไจบางชนิดที่มีรูปร่างยาวด้วยเส้นใย ทำให้เกิดการจมตัวไม่ลงของตะกอน

3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ

3.5.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในกระบวนการแอกติเวตเตดสลัดจ์ ดังนั้นหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดยอาจจะทำให้มีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์สูง (มีอาหารมาก) ทำให้จำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีลักษณะเติบโตกระจายอยู่ทั่วไป (Dispersed growth) แทนที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มกันที่ดี (Floc) เป็นผลให้ตะกอนได้ไม่ดี น้ำออกขุ่นและมีค่าสารอินทรีย์หรือบีโอดีเหลืออยู่สูง (มีอาหารน้อย) จนทำให้จำนวนจุลินทรีย์เจริญเติบโตลดน้อยลง ซึ่งถึงแม้ตะกอนจุลินทรีย์จะตกตะกอนได้เร็วแต่ก็ไม่สามารถจับตะกอนเล็ก ๆ ตกลงมาได้หมด ทำให้น้ำที่ออกจากถังตกตะกอนขุ่น

3.5.2 อาหารเสริม

จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริม (Nutrients) ซึ่งได้แก่ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและเหล็กนอกเหนือจากสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งนำมาใช้เป็นพลังงานปกติแร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่ครบในน้ำเสียจากชุมชน (Domestic wastewater) แต่อาจจะมีไม่พอในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การขาดอาหารเสริมที่สำคัญเหล่านี้จะทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟลอคเติบโตได้ไม่ดี จนทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใย (Filamentous) เจริญเติบโตได้มากกว่า ซึ่งจะทำให้ตะกอนเร่งตกตะกอนได้ยากและเกิดเป็นชั้นตะกอนอืดขึ้นมาสูงในถังตะกอนและอาจจะล้นไหลออกมากับน้ำจนระบบไม่สามารถทำงานต่อไปได้อีกได้ นอกจากนี้การที่จุลินทรีย์หลายชนิดเจริญเติบโตได้ไม่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานต่าง ๆ ของระบบต่ำอีกด้วย ปกติจะควบคุมให้บีโอดี 100 กิโลกรัม ต้องมีไนโตรเจน 5 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส 1 กิโลกรัม และเหล็ก 0.5 กิโลกรัม

3.5.3 ออกซิเจนละลายน้ำ

ในถังเติมอากาศจะต้องมีค่าออกซิเจนละลายน้ำระหว่าง 1 ถึง 2 มก./ลิตร ซึ่งปริมาณของอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้เพื่อรักษาค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงจุลินทรีย์สามารถทำงานได้มากก็จะต้องการออกซิเจนมาก นอกจากนั้นที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนจะมีค่าการละลายน้ำอิ่มตัว (Saturation valve) ต่ำจึงทำให้ต้องเพิ่มออกซิเจนให้กับระบบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังเติมอากาศสูง ในทำนองเดียวกันหากอุณหภูมิของน้ำต่ำก็ทำให้มีความต้องการเติมอากาศน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ในการที่จะรักษาระดับความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ค่าเท่ากัน

3.5.4 ระยะเวลาในการบำบัด

ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในถังเติมอากาศ จะต้องมากพอเพียงที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายมลสารต่าง ๆ หากมีระยะเวลาต่ำเกินไปสารที่ย่อยยาก ๆ จะถูกย่อยไม่ถึงขั้นสุดท้าย ทำให้มีค่าบีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียมาก สำหรับระยะเวลาในถังตกตะกอนขั้นสองก็เช่นเดียวกันหากมีน้อยเกินไปก็จะทำให้ตะกอนเร่งตกตะกอนได้ไม่ดี แต่ถ้านานเกินไปก็จะทำให้ตะกอนเร่งขาดออกซิเจนและเน่าได้

3.5.5 ค่าพีเอช

พีเอช (pH) เป็นค่าแสดงความเป็นกรด-ด่าง ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ถือว่าเป็นกลาง ถ้าน้อยกว่า 7 ถือว่าเป็นกรดและถ้ามากกว่า 7 ถือว่าเป็นด่างแบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชระหว่าง 6.5 กับ 8.5 ถ้าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 6.5 รา (Fungi) จะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงและตกตะกอนได้ไม่ดี ส่วนที่ค่าพีเอชสูงจะทำให้ฟอสฟอรัสแยกตัวออกมาจากน้ำ (Precipitate) และจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ระบบทำงานได้ไม่ดีเช่นกัน แต่ถ้าพีเอชมีค่าต่ำมากหรือสูงมากจุลินทรีย์ก็จะตายหมดไม่สามารถดำรงชีพต่อไปได้

3.5.6 สารเป็นพิษ

สารเป็นพิษแบ่งออกได้เป็นสองจำพวก คือแบบพิษเฉียบพลัน (Acute toxicity) ซึ่งจุลินทรีย์จะตายหมดภายในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง และแบบพิษออกฤทธิ์ช้า (Chronic toxicity) ซึ่งใช้เวลานานและค่อย ๆ ตาย พิษเฉียบพลัน สามารถสังเกตได้ง่ายเนื่องจากมีผลเกิดขึ้นรวดเร็ว สารพิษจำพวกนี้ได้แก่ ไซยาไนด์ , อาร์เซนิค เป็นต้น สำหรับสารพิษออกฤทธิ์ช้า เช่น ทองแดง และโลหะหนักต่าง ๆ จุลินทรีย์จะสะสมเอาไว้ภายในในเซลล์จนเกิดเป็นพิษและตายในที่สุด นอกจากนั้นอาจจะเกิดจากสารอินทรีย์ก็ได้ เช่น แอมโมเนียมีค่าความเข้มข้นสูงเกิน500 มก./ลิตร เป็นต้น

3.5.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการตะกอนเร่ง โดยทั่ว ๆ ไปการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทุก 10 °ซ. จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัวจนถึงอุณหภูมิประมาณ 37° ซ. จากนั้นอุณหภูมิจะร้อนเกินไปจนจุลินทรีย์เจริญเติบโตน้อยลงอย่างรวดเร็ว

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิยังมีผลการทำงานในถังตกตะกอนขั้นสอง โดยพบว่าทุกอุณหภูมิต่ำ ตะกอนจะตกได้ดีกว่าอุณหภูมิสูง และถ้าอุณหภูมิในถังตกตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันเกิน 2 °ซ. จะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำ เนื่องจากมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่า Density current

3.5.8 การกวน

ภายในถังเติมอากาศจะต้องมีการกวนอย่างทั่วถึง เพื่อป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอน และเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียที่ส่งเข้ามาบำบัดโดยใช้เป็นอาหาร และลดมลสารต่าง ๆ รวมทั้งจะได้จับตัวกันเป็นฟลอคที่ดี การกวนที่ถูกต้องจะป้องกันมิให้น้ำเสียไหลลัดวงจร และทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารสูง การกวนที่สมบูรณ์ในถังเติมอากาศแบบ

กวนสมบูรณ์ (Completely mixed) จะต้องมีค่า MLSS และค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำสม่ำเสมอกันทั่วทั้งถัง

3.5.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ส่งเข้าระบบบำบัด มีผลโดยตรงต่อการทำงานของกระบวนการทางชีววิทยาและในถังตกตะกอนหากน้ำเสียมีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น และระยะเวลาในการตกตะกอนในถังตกตะกอนขั้นสองลดลงด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงส่วนอัตราการไหลที่น้อยเกินไปก็มีผลเสียเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมให้มีการส่งน้ำเสียเข้ามาบำบัดอย่างสม่ำเสมอในอัตราที่ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้เช่น อาจจะสร้างเป็นบ่อพักเก็บกัก (Equalizing tank) เป็นต้น

3.6 จลน์ศาสตร์ของระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์

ในระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์การเจริญเติบโตของจุลชีพแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

3.6.1 การเจริญเติบโตของเซลล์(CellGrowth)และการใช้สารอาหาร (substrate Utilization)

อัตราการทำปฏิกิริยาสำหรับการเจริญเติบโตของจุลชีพ เป็นปฏิกิริยาอันดับแรก(First order reaction) ตามสมการ

$$r_{Gxv} = \mu X_v \qquad (3.1)$$

โดยที่

r_{Gxv} = อัตราการผลิตเซลล์จุลชีพที่มีชีวิต (มก./ลิตร-ชม.)

X_v = ความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพที่มีชีวิต (มก./ลิตร)

μ = ตัวคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate constant) (ชม.$^{-1}$)

ส่วนอัตราการใช้สารอาหารหรืออัตราการเจริญเติบโตที่แท้จริง (Y_g) มีความสัมพันธ์อันดับแรกกับความเข้มข้นของเซลล์ที่มีชีวิต

$$Y_g = \frac{r_{Gxv}}{-r_s} \qquad (3.2)$$

โดยที่ $-r_s$ = อัตราการหายไปของสารอาหาร (มก./ลิตร-ชม.)

เมื่อรวมสมการที่ (3.1) และ (3.2) เข้าด้วยกันแล้วจะได้

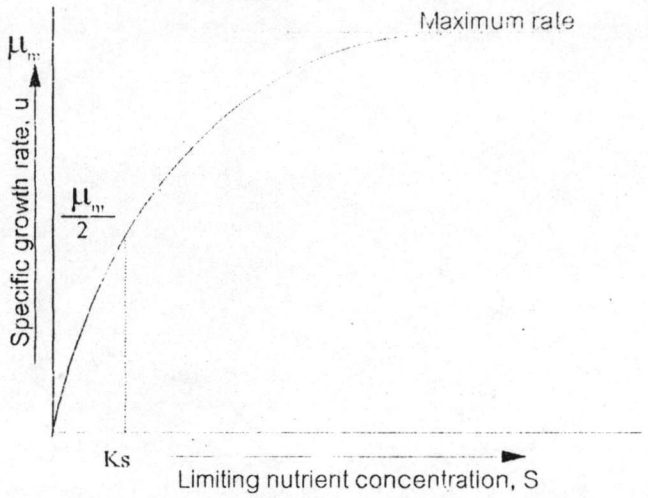
$$-r_s = \frac{r_{Gxv}}{Y_g} = \frac{\mu X_v}{Y_g} \qquad (3.3)$$

อัตราส่วน $\frac{\mu}{Y_g}$ เรียกว่าอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ(specific rate of substrate removal, q)

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) มีความสัมพันธ์กับสารอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโต (S) ที่อยู่ในตัวกลางรอบ ๆ ตามสมการของ Monod

$$\mu = \mu_m \frac{(S)}{K_s+S} \qquad (3.4)$$

โดย μ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารอาหาร และจะเข้าใกล้ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง คือ ค่า μ_m



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) กับปริมาณสารอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโต (S) , Monod (1949)

โดยที่ K_s = ค่าคงที่การอิ่มตัว (satuaration constant) หรือตัวคงที่ที่มีความเร็วครึ่งหนึ่ง (half velocity constant)

3.6.2 การสลายตัวของจุลินทรีย์ (decay)

ทำนองเดียวกันกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อาจสมมติได้ว่าเกิดเป็นปฏิกิริยาอันดับแรกโดยมีสัมประสิทธิคงที่ อัตราการขยายตัวขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ที่กำลังสลายตัวตามสมการ

$$r_{dXv} = b_v X_v \qquad (3.5)$$

$$r_{dXd} = b_d X_d \qquad (3.6)$$

โดยที่ r_{dXv} และ r_{dXd} = อัตราการหายไปของเซลล์ที่มีชีวิตและเซลล์ที่ตายแล้ว (มก./ลิตร-ชม.)

b_v และ b_d = ตัวคงที่อัตราการสลายตัวจำเพาะสำหรับเซลล์ที่มีชีวิตและเซลล์ที่ตายแล้ว (ชม.$^{-1}$)

มวลของเซลล์ที่มีชีวิตจะหายไปจากระบบโดยถูกใช้ไปในการบำรุงรักษา (maintenance) และการถูกล่า (predation) ส่วนมวลของเซลล์ที่ตายแล้วจะหายไปโดยการล่าและการแตกตัว (lysis) b_d มีค่าน้อยกว่า b_v แต่ในทางปฏิบัติจะสมมติว่า $b_v = b_d = b$ และจะคงที่สำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ (Cuture) นั้น ๆ

3.6.3 การตาย (Death)

อัตราการตายของเซลล์ที่มีชีวิต เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของเซลล์ที่มีชีวิตในตัวกลาง

$$r_{dXv} = \gamma X_v \qquad (3.7)$$

โดยที่ r_{dXv} = อัตราการตายของเซลล์ที่มีชีวิต (มก./ลิตร–ชม.)

γ = อัตราการตายจำเพาะของจุลชีพ ($ชม^{-1}$)

3.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ_c กับ μ และ S

ในระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ที่มีการหมุนเวียนตะกอนกลับ ระยะเวลาที่เซลล์จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (mean cell residence time, θ_c) ซึ่งมีนิยามว่า คืออัตราส่วนระหว่างมวลของเซลล์ที่มีชีวิตในระบบกับมวลของเซลล์ที่มีชีวิตที่หายไปต่อหน่วยเวลานั้น เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ควบคุมระบบ เพราะสามารถควบคุมให้มีค่าใดค่าหนึ่งได้โดยวัดอัตราทิ้งตะกอน θ_c มีความสัมพันธ์กับค่า μ ตามสมการ

$$\mu = \frac{1 + \gamma + b}{\theta_c} \qquad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.4) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$S = \frac{\mu Ks}{\mu_m - \mu} \qquad (3.9)$$

เมื่อแทนค่า μ สมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.9) จะได้

$$S = \frac{Ks\,(1/\theta_c + \gamma + b)}{\mu_m - (1-\theta_c + \gamma + b)} \qquad (3.10)$$

สมการนี้มีแสดงให้เห็นว่า θ_c มีผลทั้งกับ μ และ S

3.6.5 ยีลด์จากการสังเกต (Observed Yield)

การวัดมวลของจุลชีพสามารถวัดได้ในรูปของยีลด์ที่ได้จากการสังเกตุ (Y) ซึ่งก็คือปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยสารอาหารจำกัดที่ถูกใช้ไป ค่าของ Y ขึ้นอยู่กับ θ_c ตามสมการ

$$Y = \frac{Y_g}{1+b\theta_c} \qquad (3.11)$$

จากสมการนี้จะเห็นว่าเมื่อ θ_c เพิ่มขึ้นค่า Y ลดลง เนื่องจากการสลายของเซลล์เพิ่มขึ้น