

รายงานการฝึกอบรม เรื่อง ผู้ควบคุมระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ
รุ่นที่ 68 ระหว่าง 18-22 สิงหาคม 2568
เพื่อเผยแพร่ในเวปไซด์สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ

มลพิษที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำถูกปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดหลายประเภท ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารมลพิษ โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทของแหล่งกำเนิดที่สำคัญได้ 2 ประเภท คือ

1. **ประเภทที่ระบุตำแหน่งได้แน่นอน (Point source)** โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดเดี่ยว มีจุดปล่อยมลพิษเป็นลักษณะท่อหรือรางระบายจากแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุที่มาหรือตำแหน่งของจุดปล่อยมลพิษได้ เช่น น้ำทิ้งจากท่อระบายของโรงงานอุตสาหกรรมหรือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เป็นต้น

2. **ประเภทไม่สามารถระบุตำแหน่งได้แน่นอน (Non-point source)** มักเกิดจากมลสารที่มาจากแหล่งกำเนิดหลาย ๆ แหล่ง หรือแหล่งกำเนิดที่อยู่กระจัดกระจาย (Miscellaneous or diffuse sources) ถูกพัดพาและไหลปะปนรวมกันลงไปในแหล่งน้ำ ไม่สามารถจำแนกที่มาหรือระบุตำแหน่งของจุดปล่อยมลพิษได้ เช่น น้ำฝนที่ไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรมก็จะชะล้างเอาทั้งปุ๋ย ยาฆ่าแมลง สารเคมี และตะกอนดินที่ตกค้างทั่วทั้งพื้นที่ หรือน้ำฝนที่ไหลผ่านถนนในเมืองก็จะชะเอาดินโคลน คราบน้ำมัน สารเคมี และเศษขยะตกค้างตามท้องถนนไหลรวมกันลงไปในแหล่งน้ำ

แหล่งกำเนิดที่สำคัญ

น้ำเสีย คือ น้ำที่ปนเปื้อนมลพิษ ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดหลายประเภท ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารมลพิษ โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทของแหล่งกำเนิดที่สำคัญได้ดังนี้

1. น้ำเสียจากชุมชนได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน น้ำเสียนี้มีสกปรกในรูปของสารอินทรีย์สูง

2. น้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรม ตั้งแต่ขั้นตอนการล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิตจนถึงการทำความสะอาดโรงงาน รวมทั้งน้ำเสียที่ยังไม่ได้รับการบำบัดหรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม องค์ประกอบของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำทิ้งประเภทและขนาดของโรงงาน

3. น้ำเสียจากเกษตรกรรมได้แก่น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมทางการเพาะปลูก การเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากการเพาะปลูกจะมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และสารพิษต่าง ๆ ในปริมาณสูง ส่วนน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์ จะพบสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่

หลักการเลือกระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม

หลักการโดยทั่วไปในการเลือกใช้หรือการประยุกต์ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมนั้นมี หลักการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ความเหมาะสมของกระบวนการ (Process Applicability)

2. ช่วงอัตราการไหลของน้ำเสียที่น้ำเสีย (Applicable Flow Range)
3. ความผันแปรของอัตราการไหลของน้ำเสีย (Applicable Flow Variation)
4. ลักษณะของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ (Influent Wastewater Characteristic)
5. สารที่ยับยั้งและสารที่บำบัดไม่ได้ (Inhibiting and Unaffected Constituent)
6. ข้อจำกัดด้านสภาพอากาศ (Climate Constraints)
7. ข้อกำหนดทางเคมี (Chemical Requirements)
8. ข้อกำหนดด้านพลังงาน (Energy requirements)
9. ข้อกำหนดทางกฎหมาย (Law)
10. ต้นทุนการดำเนินการ (COST) ทั้งราคาที่ดิน ค่าก่อสร้าง ฯลฯ

การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึงการดำเนินการเปลี่ยนสภาพของเสียในน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมพอที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อแหล่งรับน้ำเสียนั้น ๆ ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียแบ่งได้ 3 ประเภท คือ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี และการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ

1.การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Wastewater Treatment)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นการเพื่อกำจัดหรือขจัดเอาสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย โดยเฉพาะสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำใช้เป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียขั้นแรกที่ถูกนำมาใช้ก่อนที่น้ำเสียจะถูกนำไปบำบัดขั้นต่อไป มีหลายวิธีได้แก่ การกรองด้วยตะร่ แกรง การทำให้ลอย รานดักกรวดทราย การปรับสภาพการไหล การแยกด้วยแรงเหวี่ยง การตกตะกอน และการกรอง เป็นต้น

1.1 การกรองด้วยตะร่แกรง (Screening) เป็นการดักสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย

1.2 การทำให้ลอย (Flotation) เป็นการแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยากหรือมีลักษณะกึ่งจมกึ่งลอยโดยใช้ฟองอากาศเป็นตัวพาหรือยกสิ่งสกปรกให้ลอยสูงขึ้นสู่ผิวของของเหลวกลายเป็นฟู่ แล้วกวาดออกหรือตักออกโดยใช้เครื่องมือกล

1.3 รานดักกรวดทราย (Grit Chamber) รานดักกรวดทรายเป็นเครื่องมือที่ใช้แยกเอาของแข็งที่น้ำหนักมากออกจากน้ำเสีย

1.4 การปรับสภาพการไหล (Flow Equalization) เป็นการเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่ง เพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเสียซึ่งไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่องและทำให้ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าคงที่และสม่ำเสมอ

1.5 การตกตะกอน (Sedimentation) การตกตะกอนเป็นการแยกเอาของแข็งที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำออกจากน้ำเสียโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก

2.การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Wastewater Treatment)

การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสียเพื่อรวมตะกอนหรือของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กในน้ำเสียให้มีขนาดโตพอที่จะตกตะกอนได้ง่ายเรียกตะกอนดังกล่าวว่า Floc และเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การสร้างตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation) หรือเพื่อให้ของแข็งหรือโลหะที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำเสียเช่น โครเมียม นิกเกิล ให้กลายเป็นตะกอนของแข็งและแยกตัวออกจากน้ำเสีย เรียกกระบวนการนี้ว่า การตกตะกอนผลึก (precipitation) ทั้งนี้การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้เป็น การปรับปรุงสภาพน้ำเสียให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดด้วยกระบวนการอื่นต่อไปเช่น การทำให้น้ำเสียมีความเป็นกลางก่อนแล้วนำไปบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ หรือเป็นการบำบัดขั้นสุดท้ายเพื่อทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ หรือก่อนที่จะบำบัดด้วยวิธีการอื่น ๆ ต่อไป

- การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (chemical coagulation หรือ precipitation) เป็นการใช้สารเคมีช่วยตกตะกอนโดยให้เติมสารเคมี (coagulant) เช่น สารส้ม หรือ เพอริกคลอไรด์ ลงไป เพื่อเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กให้รวมกันมีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า (flocculation) และหากการรวมตัวกันของตะกอนเกิดขึ้นได้ช้า ก็อาจจะมีสารช่วยการรวมตัวของตะกอน (coagulant aid) เป็นสารโพลีเมอร์ เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการตกตะกอน
- การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการปรับปรุงสภาพความเป็นกรด - ด่าง หรือพีเอชให้อยู่ในสภาพที่เป็นกลาง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดน้ำเสียในขั้นอื่น
- การทำลายเชื้อโรค (disinfection) การทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียเป็นการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคโดยใช้สารเคมีหรือสารอื่น ๆ ทำลายเชื้อโรคก่อนที่จะถูกปล่อยลงแหล่งรับน้ำทิ้ง สารเคมีที่นิยมใช้ในการกำจัดเชื้อโรค ได้แก่ คลอรีน และสารประกอบคลอรีน เนื่องจากมีราคาถูกและใช้งานได้ง่าย

3. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological Wastewater Treatment)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นการใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนสภาพของของเสียในน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษต่อไปได้ เช่น เปลี่ยนให้เป็นแก๊ส ระบายไปในบรรยากาศ จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศที่พบมากและมีความสำคัญได้แก่แบคทีเรีย รา โปรโตซัว และโรติเฟอร์ โดยแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สำคัญที่สุดเนื่องจากแบคทีเรียทำหน้าที่ย่อยสลายและเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นสารที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของแหล่งกำเนิดน้ำเสีย เช่น น้ำเสียชุมชนจะประกอบด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน โดยที่สารอินทรีย์ดังกล่าวยังแบ่งออกเป็น สารที่ย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ (Biodegradable organic) และไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ (Non-biodegradable organic) โดยสารประกอบโปรตีนในส่วนที่ย่อยสลายได้จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียและกรดอะมิโน ซึ่งแบคทีเรียสามารถใช้เป็นสารอาหารหรือแหล่งไนโตรเจน เพื่อการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ ส่วนของคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน (carbonaceous organic matter) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ย่อยสลายได้ง่าย เช่น แป้งและน้ำตาล และกลุ่มที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น เซลลูโลส ขณะที่ไขมันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ช้าโดยแบคทีเรีย เนื่องจากน้ำเสียจะประกอบด้วยสารอินทรีย์คาร์บอนหลายชนิดปะปนกัน ดังนั้นการหาปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจึงเป็นการวิเคราะห์แบบรวมไม่จำเพาะเจาะจงถึงการระบุชนิดและประเภทของสารใดสาร

หนึ่ง โดยใช้การวิเคราะห์ในรูปของบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) หรือ ซีโอดี (Chemical oxygen demand; COD) แทน

3.1 การกำจัดสารอินทรีย์

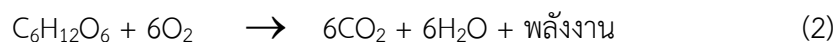
กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยวิธีทางชีวภาพในน้ำเสียจะอาศัยการทำงานของแบคทีเรียเป็นหลัก โดยแบคทีเรียจะใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูป BOD เป็นสารอาหารหรือแหล่งคาร์บอนเพื่อการเติบโต กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ สามารถแบ่งได้ตามรูปแบบการหายใจและชนิดของแบคทีเรีย โดยแบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะประกอบด้วย

1) สภาวะมีออกซิเจนอิสระ (Aerobic condition)

กลไกหลักในการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph Bacteria) ซึ่งใช้ออกซิเจนอิสระเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อสังเคราะห์เซลล์ใหม่ ดังสมการที่ 1



ในรูปสมการทั่วไป สามารถใช้กลูโคสเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่าย ดังแสดงในสมการที่ 2



จากสมการที่ 2 สามารถคำนวณความต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในการสันดาปสารอินทรีย์คาร์บอนได้ โดยสามารถใช้สูตรเคมีอย่างง่าย $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ แทนสารอินทรีย์คาร์บอน ดังแสดงในสมการที่ 3



การเปลี่ยนรูปหรือการย่อยสลายของสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียภายใต้สภาวะมีอากาศ โดยใช้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟนั้น สามารถสรุปกระบวนการหลักได้ดังนี้

- สารอินทรีย์คาร์บอนเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และสารอาหารอื่นๆ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์คาร์บอนนั้น โดยส่วนมากจะมีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์
- แบคทีเรียที่มีในระบบบำบัดน้ำเสียจำนวนมากมีการการดูดซึม (assimilation) โดยมวลตะกอนชีวภาพ (biomass) หรือสลัดจ์ (Sludge)

2) สภาวะแอนน็อกซิก (Anoxic condition)

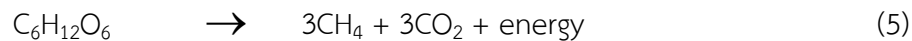
ภายใต้สภาวะไร้อากาศแต่มีสารประกอบไนโตรเจน กลุ่มไนไตรต์หรือไนเตรตอยู่ด้วยเรียกว่า สภาวะแอนน็อกซิก แบคทีเรียพวกแฟคัลตาทีฟ (Facultative Bacteria) สามารถใช้ไนเตรตหรือไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน เพื่อสังเคราะห์เซลล์ใหม่ เรียกกระบวนการนี้ว่า การหายใจหรือการเติบโตแบบแอนน็อกซิก (Anoxic Growth) ดังสมการที่ 4



กระบวนการเติบโตแบบแอนอโรบิกนี้ มีความสัมพันธ์กับการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพที่เรียกว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อการกำจัดไนโตรเจนต่อไป

3) สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic condition)

การกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนภายใต้สภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระหรือสารประกอบไนโตรตหรือไนเตรตอยู่ในระบบ และอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอนแอโรบิก โดยสมการอย่างง่ายสามารถใช้กลูโคสเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์คาร์บอนแสดงการย่อยสลาย ดังสมการที่ 5



กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์คาร์บอน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

- **ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)** สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันจะถูกย่อยสลายให้อยู่ในรูปโครงสร้างเชิงเดี่ยวอย่างง่าย (simple monomers) เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน ตามลำดับ
- **การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) หรือกระบวนการหมัก (fermentation)** สารอินทรีย์โครงสร้างเชิงเดี่ยวอย่างง่ายที่เกิดขึ้นจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) เปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid; VFA) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวไทริก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนนี้ยังไม่ถูกจัดเป็นการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนแต่เป็นเพียงการเปลี่ยนรูปเท่านั้น
- **การสร้างอะซิเตท (Acetogenesis)** กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นไม่สามารถใช้ในการสร้างมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (Acetogenic bacteria) จึงเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน โดยจะย่อยสลายกรดไขมันระเหยให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจน
- **การสร้างมีเทน (Methanogenesis)** เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเปลี่ยนรูปและกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนแบบไร้อากาศ โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในรูปย่อยสลายง่าย เช่น VFA ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกจากระบบโดยแบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic

3.2 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนตามลักษณะการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

3.2.1 ระบบจุลินทรีย์แขวนลอย (suspended system)

เป็นระบบที่มีแบคทีเรียแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนผสมอย่างเหมาะสม และมีปริมาณออกซิเจนในน้ำที่เพียงพอความต้องการของแบคทีเรียดังกล่าว เช่น ระบบแอกทิเว-เต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge; AS) เป็นต้น

1) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง หรือ เอเอส (Activated Sludge)

ระบบเอเอส เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย มีองค์ประกอบหลักคือ ถังเติมอากาศ และถังตกตะกอน จุลินทรีย์ในถังเติมอากาศจะอาศัยสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหาร และออกซิเจนจากการเติมอากาศในถังเติมอากาศ เพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณกลายเป็นสลัดจ์ จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำใสให้ไหลล้นออกมไปสู่ระบบบำบัดขั้นสุดท้าย และตะกอนบางส่วนก็จะถูกสูบย้อนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศ เพื่อควบคุมตะกอนจุลินทรีย์ แล้วถูกส่งเข้าถังตกตะกอนอีกครั้ง ซึ่งจะเป็นไปอย่างนี้เรื่อย ๆ จนกว่าน้ำจะสะอาด

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส ยังสามารถแยกย่อยต่าง ๆ ได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับการจัดวาง และรูปแบบของถังเติมอากาศ

1.1 ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge)

ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบธรรมดา หมายถึง ระบบที่มีถังเติมอากาศ และถังตกตะกอน การเติมอากาศจะใช้เครื่องเติมอากาศแบบใบพัดหรือแบบฟองอากาศก็ได้ โดยปกติระบบจะมีเวลากักตะกอน (Sludge Retention Time; SRT) ประมาณ 5 – 10 วัน ระบบนี้มักเป็นระบบที่มีการกวนไหลตามกัน (Plug Flow) ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบเส้นใยได้ดีกว่าการกวนสมบูรณ์ เนื่องจากการกวนแบบไหลตามกันจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยให้แบคทีเรียแบบสร้างฟลอคเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบบเส้นใย

1.2) ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Activated Sludge)

ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์ เป็นการปรับปรุงจากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบธรรมดาให้เกิดการกวนสมบูรณ์ ลักษณะสำคัญของระบบแบบนี้ คือ จะต้องถังเติมอากาศที่สามารถกวนให้น้ำและตะกอนที่อยู่ในถังผสมเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งถัง ระบบแบบนี้สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Shock Load) ได้ดี เนื่องจากน้ำเสียจะกระจายไปทั่วถึง และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในถังเติมอากาศก็มีค่าสม่ำเสมอ ทำให้แบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่มีอยู่มีลักษณะเดียวกันตลอดทั้งถัง (Uniform Population) การกวนแบบสมบูรณ์นี้จะสามารถใช้ได้ดีกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งอาจมีสารพิษเจือปนอยู่ เนื่องจากการเจือจางจะเกิดขึ้นทันทีทำให้สารพิษมีความเข้มข้นลดน้อยลง

1.3) ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบยืดเวลา (Extended Aeration Activated Sludge)

ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบยืดเวลา เป็นกระบวนการที่มีระยะเวลาพักชลศาสตร์และอายุสลัดจ์ (Sludge Retention Time; SRT) นานกว่าระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบอื่นๆ โดยมีความมุ่งหมายให้แบคทีเรียอยู่ในถังเติมอากาศนานๆ และได้รับอาหารน้อยๆ เพื่อให้เกิดการย่อยสลายตัวเอง เป็นผลให้มีตะกอนส่วนเกิน (Excess Sludge) เกิดขึ้นน้อยและอยู่ในรูปที่สามารถนำไปทิ้งได้ ดังนั้นระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีถังย่อยตะกอน

1.4) ระบบคูวนเวียน (Oxidation Ditch; OD)

ลักษณะสำคัญของระบบคูวนเวียนนี้ คือ รูปแบบของถังเติมอากาศจะมีลักษณะเป็นวงรีหรือวงกลม ทำให้น้ำไหลวนเวียนตามแนวยาว (Plug Flow) ของถังเติมอากาศ และรูปแบบการกวนที่ใช้เครื่องกลเติมอากาศตีน้ำในแนวนอน (Horizontal Surface Aerator) หรือเครื่องเติมอากาศรูปแบบอื่นๆ ที่มีการผลักดันน้ำให้ไหลไปตามแนวยาวของถัง รูปแบบของถังเติมอากาศลักษณะนี้สามารถควบคุมให้เกิดสภาวะที่เรียกว่า แอโนกซิก (Anoxic Zone) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนละลายในน้ำทำให้ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^{2-}) ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ

ไนโตรเจน (N_2) โดยแบคทีเรียจำพวกไนโตรฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrosomonas Spp. และ Nitrobactor Spp.) ทำให้ระบบสามารถบำบัดไนโตรเจนได้

1.5) ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Activated Sludge)

ลักษณะสำคัญของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบปรับเสถียรสัมผัส คือ จะแบ่งถังเติมอากาศออกเป็น 2 ถังอิสระจากกัน ได้แก่ ถังสัมผัส (Contact Tank) และถังย่อยสลาย (Stabilization Tank) โดยตะกอนที่สูบลมาจากถังถังตกตะกอนชั้นสองจะถูกส่งมาเติมอากาศใหม่ในถังย่อยสลาย จากนั้นตะกอนจะถูกส่งมาสัมผัสกับน้ำเสียในถังสัมผัส (Contact Tank) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในถังสัมผัสนี้ความเข้มข้นของสลัดจ์จะลดลงตามปริมาณน้ำเสียที่ผสมเข้ามาใหม่ น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วจะไหลไปยังถังตกตะกอนชั้นที่สองเพื่อแยกตะกอนกับส่วนน้ำใส โดยน้ำใสส่วนบนจะถูกระบายออกจากระบบ และตะกอนที่ก้นถังส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปเข้าถังย่อยสลาย และอีกส่วนหนึ่งจะนำไปทิ้ง จะเห็นได้ว่าถังย่อยสลายจะมีความเข้มข้นของแบคทีเรียภายในถังเท่ากับความเข้มข้นของตะกอนในถังตกตะกอนชั้นที่สอง ส่วนถังสัมผัสจะมีความเข้มข้นของแบคทีเรียต่ำกว่าความเข้มข้นของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ทั่วไป เมื่อรวมทั้งสองถังเข้าด้วยกัน จะทำให้ระบบนี้มีมวลของแบคทีเรียในระบบมากกว่าระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบอื่นที่มีขนาดถังเติมอากาศเท่ากัน

1.6) ระบบบ่อหรือสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon)

บ่อหรือสระเติมอากาศ อาจถือเป็นระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบไม่มีการหมุนเวียนตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มักเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ที่มีเวลากักพักชลศาสตร์หลายวัน มีการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศแบบลอยน้ำแต่ไม่มีถังตกตะกอน ด้วยเหตุนี้น้ำทิ้งจึงมีแบคทีเรียแขวนลอยหลุดออกไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำกว่าระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบอื่นๆ และเนื่องจากระบบไม่มีการหมุนเวียนตะกอน ความเข้มข้นของ MLSS ในถังเติมอากาศจึงมีระดับต่ำกว่าระบบอื่นๆ

1.7) ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor; SBR)

ระบบเอสบีอาร์มีลักษณะสำคัญของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบนี้คือ เป็นระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ประเภทเติมเข้า-ถ่ายออก (Fill-and-Draw Activated Sludge) โดยมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียแตกต่างจากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบอื่น ๆ คือ การเติมอากาศ (Aeration) และการตกตะกอน (Sedimentation) จะดำเนินการเป็นไปตามลำดับภายในถังปฏิกรณ์เดียวกัน โดยการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ 1 รอบการทำงาน (Cycle) จะมี 5 ช่วงตามลำดับ ดังนี้

- 1) ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) นำน้ำเสียเข้าระบบ
- 2) ช่วงทำปฏิกิริยา (React) เป็นการการเติมอากาศให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (ลดค่าบีโอดี)
- 3) ช่วงตกตะกอน (Settle) หยุดเติมอากาศและปล่อยให้แบคทีเรียตกลงก้นถังปฏิกรณ์
- 4) ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw) ระบายน้ำใสส่วนบนที่ผ่านการบำบัดแล้วออกนอกถัง
- 5) ช่วงพักระบบ (Idle) เพื่อรอรับน้ำเสียใหม่

โดยการเดินระบบสามารถเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในแต่ละช่วงได้ง่ายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการบำบัด

3.2.2) ระบบแบคทีเรียเกาะผิวตัวกลาง (Attached Growth System)

เป็นระบบที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตแบบเกาะติดผิวตัวกลางที่สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายและใช้พลังงานในการเดินระบบต่ำ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบคือ 1) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) 2) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor) หรือเรียกว่า ระบบฟิล์มตรึง (fixed film system) และ 3) ระบบตัวกลางลอยตัวแบบใช้อากาศ (Aerobic Fluidized Bed)

1) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter)

หลักการทำงานของระบบโปรยกรอง เป็นระบบที่มีแบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่บนผิวตัวกลาง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วจะถูกปล่อยให้ไหลผ่านชั้นของตัวกลาง แบคทีเรียที่เกาะติดอยู่บนตัวกลางจะใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาร่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย น้ำที่ผ่านระบบจะถูกส่งไปเข้าถังตกตะกอนสุดท้ายเพื่อแยกตะกอนออกให้ได้น้ำทิ้งที่สามารถระบายทิ้งได้

2) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor)

เป็นระบบซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นจานทรงกลมที่ทำด้วยพลาสติก Polyvinyl chloride การเกาะติดแบบนี้จะเห็นเป็นเมือกหรือฟิล์มชีวภาพทั่วทั้งแผ่น จานทรงกลมนี้อาจยึดติดตั้งฉากอยู่ด้วยแกนหมุนที่จุดกึ่งกลางของแผ่น ส่วนประกอบของจานหมุนและแกนจะติดตั้งในถังปฏิกรณ์ซึ่งอาจเป็นถังโลหะหรือบ่อคอนกรีต การทำงานของระบบแผ่นจานหมุนจะแช่อยู่ในน้ำประมาณครึ่งแผ่น (ร้อยละ 40) ของพื้นที่แผ่นจานจะจมอยู่ในน้ำเสียตลอดเวลา) หน่วยบำบัดที่สำคัญของระบบจะประกอบด้วยถังปฏิกรณ์และถังตกตะกอน

3.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อธรรมชาติ

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ทำให้เกิดการปรับสมดุลของน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการธรรมชาติ ระบบนี้ประกอบด้วยบ่อที่สร้างขึ้นเพื่อกักน้ำเสียไว้โดยมีระยะเวลาเก็บกักที่มากพอต่อการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีในบ่อตามธรรมชาติ ระบบบ่อปรับเสถียรจึงอาจถูกเรียกว่าบ่อออกซิเดชัน (Oxidation Ponds) หรือบ่อฝังกักได้เช่น ระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ประเภท

1. บ่อแอนแอโรบิกอินทรีย์สารในน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ ผลผลิตที่ได้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และก๊าซไข่เน่า
2. บ่อแอโรบิก อินทรีย์สารในน้ำเสียจะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย จึงทำให้ได้ก๊าซออกซิเจน
3. บ่อแฟคัลเททีฟ หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นแบบใช้อากาศ ที่ผิวด้านบนที่แดดส่องถึง และเป็นแบบไร้อากาศที่ก้นบ่อ
4. บ่อบ่ม ใช้รองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดต่าง ๆ มาแล้ว
5. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) เป็นระบบที่จำลองแบบพื้นที่ชุ่มน้ำมาใช้บำบัดน้ำเสียโดยการבודัดดินให้แน่น เพื่อปลูกพืชจำพวก กก แผลง ธูปฤๅษี เป็นต้น สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบบน้ำไหลบนผิวดิน และแบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

3.3.1 ระบบบำบัดแบบบ่อหมัก (Anaerobic pond)

ระบบบำบัดแบบบ่อหมักหรือบ่อหมื่น เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบที่ง่ายที่สุด อาศัยธรรมชาติมากที่สุด ระบบบ่อหมักเป็นบ่อเปิดที่มีความลึกของบ่อตั้งแต่ 3 เมตรขึ้นไปเพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากอากาศละลายลงไปในบ่อบำบัดน้ำเสียและเพื่อต้องการรักษาสภาพไร้อากาศของบ่อบำบัด จะมีการป้อนน้ำเสียเข้าทางตอนล่างของบ่อบำบัดน้ำเสียเพื่อให้เกิดการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจะแยกชั้นลอยขึ้นปกคลุมผิวหน้าในบ่อบำบัดชั้นไขมันที่ลอยปกคลุมผิวน้ำนี้ถูกเรียกว่า สกัม (Scum) ซึ่งสกัมที่ลอยอยู่นี้ทำให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงสู่น้ำได้ยากขึ้น

3.3.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic Digester)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ทำการกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนซึ่งความเข้มข้นของตะกอนที่นำมาบำบัดมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงสามารถใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยสูงมากๆ ได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังหมักไร้อากาศนี้ประกอบด้วยถังหมักหรือถังปฏิกรณ์ชีวเคมีหรือหลายใบและเป็นถังปิดที่มีการป้อนตะกอนจุลินทรีย์เข้าระบบ มีทางน้ำล้นเพื่อระบายน้ำใสออกจากบ่อมีท่อระบายก๊าซชีวภาพออกจากถัง และมีทางระบายกากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแล้วออกจากทางด้านก้นถัง

3.3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบเกาะผิวตัวกลาง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบเกาะผิวตัวกลางเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ตัวกลาง (Media) บรรจุอยู่ในระบบถังเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะที่ผิวของตัวกลาง ส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวเคมีได้นานขึ้นหรือระบบมีอายุตะกอนจุลินทรีย์นานขึ้น การบำบัดน้ำเสียจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางที่มีจุลินทรีย์เกาะอยู่ จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวกลางก็จะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีหลายแบบ ได้แก่

- ระบบถังกรองไร้อากาศ(Anaerobic filter)
- ระบบบำบัดน้ำเสียแบบจานหมุนไร้อากาศ (Anaerobic rotating biological contractor: An RBC)
- ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Anaerobic fluidized bed :AFB)

3.3.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบสร้างเมืงตะกอนจุลชีพ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้จะใช้วิธีการที่ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวเคมี และตะกอนจุลินทรีย์เหล่านั้นจะเกาะตัวกันแน่นเป็นเมืงแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวเคมี ไม่หลุดลอยปะปนออกไปกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบสร้างเมืงตะกอนจุลชีพจะมีอยู่ สองแบบ ได้แก่

1) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศชนิดขึ้นตะกอน (Up-flow anaerobic sludge blanket: UASB)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB นี้ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในถังปฏิกรณ์ชีวเคมี การทำงานของระบบจะอาศัยการสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวเคมีทางด้านล่าง มีการควบคุมความเร็วในการป้อนน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ชีวเคมีในอัตราที่เหมาะสมเพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียได้และตะกอนจะเกิดการเกาะกันเป็นเมืงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1- 5 มิลลิเมตร

เรียกว่า Granular biosludge) อยู่เป็นชั้นหนาที่มีความหนาแน่นสูงทางด้านล่างของถังหมัก (granular bacteria) และถัดจากชั้นตะกอนนี้จะเป็นชั้นของแบคทีเรียที่เป็นตะกอนเบา (Floc) และถัดจากชั้นตะกอนเบา นี้จะเป็นชั้นของน้ำเสียที่มีตะกอนเล็กๆ กระจายอยู่ ภายในถังปฏิกริยานี้จะมีการสร้างอุปกรณ์ที่เป็นแผ่นกัน ทำหน้าที่ป้องกันตะกอนไม่ให้หลุดออกจากถังและยอมให้ส่วนน้ำใสและแก๊สออกจากระบบได้

2) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นกันไร้อากาศ (Anaerobic baffled reactor)

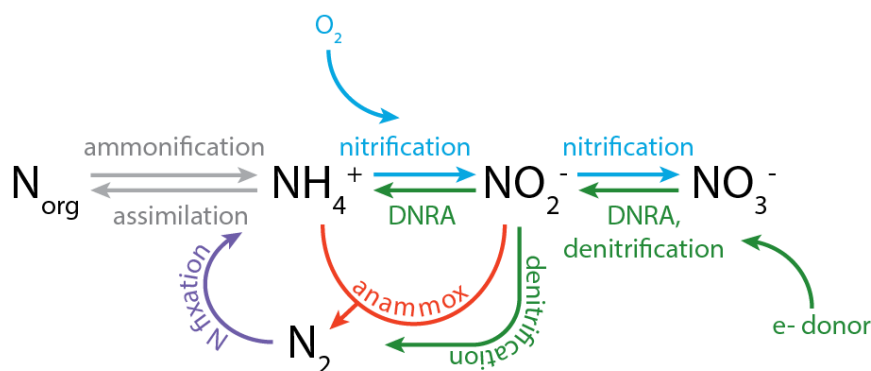
ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ จะมีแผ่นฉากมาคั่นภายในถังปฏิกริยาเพื่อให้ น้ำเสียเคลื่อนที่ไหลขึ้นลงวกไปวนมา หลายๆ ครั้งด้วยอัตราไหล 0.2 – 0.4 ม./ชม. ทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัด มีลักษณะการทำงานของระบบจะมีหลักการเช่นเดียวกับระบบ UASB เมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย เกิดการสะสมของกรดในบริเวณในบริเวณทางน้ำเสียเข้า ส่วนก๊าซมีเทนหรือก๊าซชนิดอื่นที่เกิดขึ้นในส่วนกลางและทำยถึงปฏิกริยาสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ง่าย ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ บำบัดสามารถถูกเก็บกักในถังปฏิกริยาได้ดีเนื่องจากแผ่นกัน และทิศทางการไหลของน้ำเสียจะช่วยลดการฟุ้งกระจายของตะกอนจุลินทรีย์ ในน้ำที่จะออกจากถังปฏิกริยา

3.2 การกำจัดสารอาหาร

3.2.1 กระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

ไนโตรเจนในน้ำเสียมีหลายรูปที่สำคัญได้แก่ ไนเตรท (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) แอมโมเนีย (NH_3) และอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปของไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) หรือเรียก Kjeldahl nitrogen (TKN) ซึ่งเป็นผลรวมของอินทรีย์ไนโตรเจนกับแอมโมเนียไนโตรเจน

กระบวนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในน้ำเสียเริ่มจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีนให้อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ จากนั้นจะถูกกำจัดต่อโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจนให้อยู่ในรูปไนไตรต์และไนเตรตภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน แล้วตามด้วยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มดีไนตริฟายเออร์ (Denitrifier) ทำการลดรูปไนเตรตให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนและระเหยออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

1) กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

กระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียเป็นไนไตรต์และไนเตรตเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอิสระหรือในระบบที่มีการเติมอากาศ โดยแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนียจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนย่อยประกอบด้วย

- **ไนไตรเตชัน (Nitrification)** เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนีย โดยแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียเรียกว่าพวกเอโอบี (Ammonia Oxidizing Bacteria; AOB) เช่น ไนโตรโซโมนาส ไนโตรคอคคัส ไนโตรสไพรา
- **ไนเตรเตชัน (Nitrification)** เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปของไนไตรต์ โดยแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ไปเป็นไนเตรตเรียกว่าพวกเอ็นโอบี (Nitrite Oxidizing Bacteria; NOB) เช่น ไนโตรแบคเตอร์ โดยสมการทั่วไปของไนเตรเตชัน

2) กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการลดรูป (Reduction) ไนเตรตให้เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนหลุดออกจากระบบ ซึ่งถือว่าเป็นการกำจัดไนโตรเจนที่ค่อนข้างสมบูรณ์ กระบวนการดังกล่าวอาศัยการทำงานของแบคทีเรียพวกฟาคัลเททิฟเฮเทอโรโทรป ซึ่งมีหลายกลุ่มเช่น *Achromobacter* *Acinetobacter* และ *Pseudomonas* เติบโตในสภาวะแอนอกซิกดังแสดงในสมการที่ 3.4 ภายใต้สภาวะดังกล่าวแบคทีเรียจะใช้สารอินทรีย์คาร์บอน (BOD) เป็นแหล่งคาร์บอนและตัวให้อิเล็กตรอน โดยการลดรูปจะเริ่มจากไนเตรต (NO_3^-) เป็นไนไตรต์ (NO_2^-) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) ตามลำดับ

3.2.2 กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ฟอสฟอรัสในน้ำเสียพบได้หลายรูป ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของน้ำเสียนั้น โดยส่วนมากจะพบฟอสฟอรัส ใน 3 รูปได้แก่ สารอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) สารโพลีฟอสเฟต (Poly phosphate) และออร์โธฟอสเฟต (Ortho phosphate) ซึ่งมีเพียงออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-}) รูปเดียวที่แบคทีเรียสามารถใช้เพื่อการเติบโต ดังนั้นฟอสเฟตรูปอื่นๆ จึงต้องถูกไฮโดรไลซ์ให้อยู่ในรูป PO_4^{3-} ก่อนจึงจะนำไปใช้ได้ ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเช่นระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เพียงบางส่วนผ่านกระบวนการเติบโตของแบคทีเรีย โดยการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งสุดท้ายจะถูกทิ้งออกจากระบบในรูปของตะกอนส่วนเกิน (Excess Sludge) ซึ่งเมื่อคิดเป็นสัดส่วนระบบจะสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เพียงร้อยละ 10-30 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วน COD ต่อฟอสฟอรัสและรูปแบบการเดินระบบด้วย

การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียที่ถูกออกแบบให้เป็นบีเอ็นอาร์ (Biological Nutrient Removal; BNR) นั้น เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียฟาคัลเททิฟเฮเทอโรโทรป หรือที่เรียกว่า ฟีโอโอ (Phosphorus accumulating organisms; PAOs) ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีลักษณะพิเศษในการเก็บสะสมฟอสฟอรัสปริมาณสูงไว้ในเซลล์ อาศัยและเติบโตในสภาวะแบบอากาศสลับกับสภาวะไร้อากาศ การกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งสามารถสรุปกระบวนการสำคัญได้ดังนี้

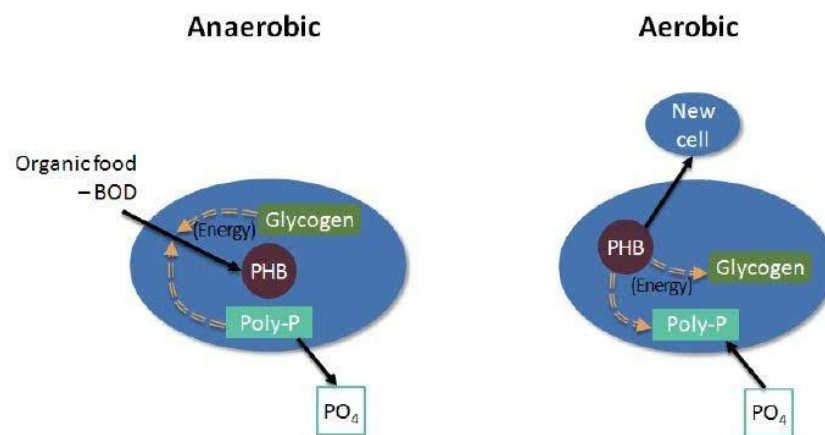
1) สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic process)

PAOs ใช้พลังงานเพื่อดึงอินทรีย์คาร์บอนหรือสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กและย่อยสลายง่าย โดยเฉพาะวีเอเอฟเอ (VFA) เข้าสู่เซลล์และเก็บสะสมไว้ในรูปสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ที่เรียกว่า พีเอชเอ (Poly-β-hydroxyalkanoate; PHA) โดยพลังงานที่ใช้ได้จากการสลายโพลีฟอสเฟต (Poly-PO₄) ที่เก็บสะสมไว้ในเซลล์และฟอสเฟต (PO₄) ที่เหลือจากกระบวนการนี้จะถูกขับออกมานอกเซลล์ ดังนั้นจะพบว่าในระบบหรือในน้ำเสียมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของ COD ในระบบ ในขั้นตอนนี้จึงเป็นการกำจัด COD ไปพร้อมกัน

2) สภาวะแอโรบิก (Aerobic process)

ในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระ PAOs จะออกซิไดซ์ PHA ในเซลล์ได้พลังงานและใช้พลังงานนั้นดึงฟอสเฟตกลับเข้าสู่เซลล์ในรูปโพลีฟอสเฟต ในขั้นตอนนี้จะดึงฟอสเฟตกลับมากกว่าที่ปล่อยออกไป จึงเป็นการดึงฟอสฟอรัสเดิมจากน้ำเสียรวมเข้าไปด้วยเป็นการสะสมฟอสฟอรัสแบบเพิ่มพูน

กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ แสดงในภาพที่ 2

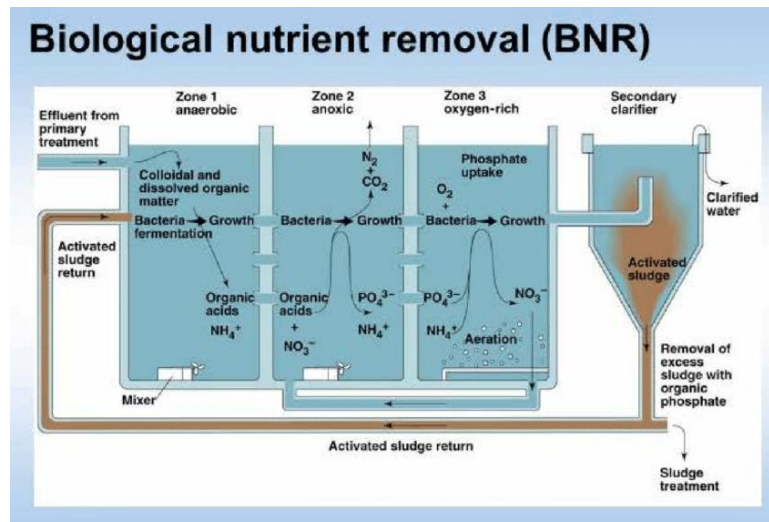


ภาพที่ 2 กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ที่มา https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-of-biological-Phosphorus-removal-11_fig1_337899538

3.2.3 ระบบกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสพร้อมกันทางชีวภาพ

ระบบกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพเป็นพัฒนาการของกระบวนการเอเอส โดยพื้นฐานของระบบเอเอสจะมุ่งเน้นที่การกำจัดสารอินทรีย์ (BOD) และสามารถลดปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งสุดท้ายที่ออกจากระบบได้บางส่วนแต่เมื่อต้องการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียให้ได้มากที่สุดจึงเกิดการวิจัยและพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพอย่างต่อเนื่องและเกิดรูปแบบของระบบที่หลากหลายขึ้นมาเพื่อตอบวัตถุประสงค์ด้านการกำจัดสารอาหารกลุ่มไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งกระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสพร้อมกันทางชีวภาพแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสพร้อมกันทางชีวภาพ

ที่มา https://www.researchgate.net/figure/Biological-nutrient-removal-BNR-process-24_fig2_348645180

1) กระบวนการเอ-ทู-โอ (A²/O Process)

ระบบนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้พร้อมๆ รูปแบบของระบบจัดให้มีการทำงานในสภาวะแอนอกซิก (Anoxic) ขึ้นอยู่ระหว่างสภาวะแอนแอโรบิก (Anaerobic) กับสภาวะแอโรบิก (Aerobic) ระบบนี้ประกอบด้วยหน่วยบำบัดหรือถังปฏิกรณ์ 3 ถังและถังตกตะกอน 1 ถังเพื่อทำหน้าที่แยกตะกอนของแข็งออกจากน้ำ จากแผนภาพแสดงการไหลของน้ำเสีย จะเห็นว่าน้ำเสียจะเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิกและไหลต่อเนื่องเข้าสู่ถังแอนอกซิกและไหลต่อไปที่ถังแอโรบิก ระบบนี้จะมีการใช้ไนเตรตในน้ำเสียจากปลายถังแอโรบิกกลับเข้ามาที่ตอนต้นของถังแอนอกซิก (Internal Recycle) โดยควบคุมอัตราส่วนของการเวียนน้ำกลับ (Recycle Ratio) อยู่ระหว่าง 1:1-2:1 เพื่อให้จุลินทรีย์นำไนเตรตไปใช้เป็นการเกิดดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนออกสู่บรรยากาศ โดยมีสารอินทรีย์ (BOD หรือ VFA) เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับให้จุลินทรีย์ใช้ในการหายใจแบบแอนอกซิก วิธีการนี้ทำให้สามารถลดปริมาณออกซิเจนลงได้ถึงร้อยละ 25

2) กระบวนการ วีไอพี (VIP Process)

ระบบ VIP (Virginia Initiative Plant) ประกอบด้วยการทำงานในสภาวะ Anaerobic, Anoxic และ Aerobic เช่นเดียวกับกระบวนการ A²/O แต่มีการปรับปรุงกระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้ดีขึ้นโดยการสูบกลับของตะกอนจุลินทรีย์จะถูกนำกลับมาที่ตอนท้ายของถัง Anaerobic ส่วนน้ำเสียที่ผ่านถัง Anoxic จะถูกนำกลับมาที่ตอนต้นของถัง Anaerobic ในอัตราส่วน 1:1-2:1 เช่นเดียวกับอัตราส่วนในการนำน้ำเสียที่ผ่านถัง Aerobic กลับมายังตอนต้นของถัง Anoxic วิธีการเช่นนี้เป็นการควบคุมสภาวะ Anaerobic แทนที่จะเป็นการเวียนตะกอนจุลินทรีย์

3) กระบวนการบาร์เดนโฟ 5 ขั้น (Five Stage Bardenpho Process)

ระบบนี้เป็นกระบวนการที่ดัดแปลงมาจากกระบวนการกำจัดไนโตรเจนแบบ Four Stage Bardenpho Process โดยการเพิ่มถัง Anaerobic ที่ตอนต้นเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส การทำงานของระบบประกอบจะใช้หน่วยบำบัดหรือถังปฏิกรณ์จำนวน 5 ถังประกอบด้วย ถัง Anaerobic, ถัง

Anoxic และถึง Aerobic เพื่อกำจัดทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารอินทรีย์ นอกจากนี้ถึง Aerobic ใบสุดท้ายยังทำหน้าที่ไล่แก๊สไนโตรเจนที่เกิดจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในถัง Anoxic และป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะ Anaerobic ในถังตกตะกอน เพื่อยับยั้งการปล่อยฟอสฟอรัสเข้ามาในน้ำเสีย อีกทั้งมีการหมุนเวียนตะกอนจุลินทรีย์จากถัง Aerobic ไปที่หนึ่งไปสู่ถัง Anoxic อีกด้วย

4) กระบวนการยูชีที (UCT Process)

ระบบนี้ได้รับการพัฒนาจาก University of Cape Town ด้วยมีการออกแบบคล้ายกับระบบ A²/O แต่ต่างกันที่มีการสูบตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียนจากถังตกตะกอนกลับมาที่ถัง Anoxic แทนที่จะกลับไปตอนต้นของถัง Anaerobic ทำให้ไม่มีการเอาไนเตรตไปใส่ในถัง Anaerobic เป็นผลให้การปล่อยฟอสฟอรัสเกิดขึ้น ส่วนการหมุนเวียนตะกอนภายใน ทำให้เพิ่มการใช้สารอินทรีย์ในถัง Anaerobic และยังเป็นการควบคุมให้เกิดสภาพการหมักในถัง Anaerobic ที่เหมาะสมด้วย

4. การบำบัดและกำจัดกากตะกอน

กากตะกอนหรือสลัดจ์ (Sludge) เป็นผลที่ได้จากกระบวนการแยกของแข็งแขวนลอยและ ของแข็งละลายออกจากน้ำเสีย โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งประมาณร้อยละ 0.25 –12 และมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่

- 1) กากตะกอนขั้นต้น (Primary Sludge) เป็นกากตะกอนที่ยังไม่ผ่านการย่อยสลาย (raw sludge) ที่ถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยตรงด้วยกระบวนการทางกายภาพ เช่น ถังตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น(primary clarifiers)
- 2) กากตะกอนชีวภาพ (Secondary Sludge หรือ Biological Sludge) เป็นกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ มีส่วนประกอบหลักเป็นจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายต่อได้

วิธีการบำบัดและกำจัดกากตะกอนประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้คือ

1) การทำให้กากตะกอนเข้มข้นขึ้น (Sludge Thickening) เป็นการทำให้กากตะกอนอัดตัวกันแน่นขึ้น ซึ่งมีผลให้ปริมาตรกากตะกอนลดลง สามารถแยกน้ำออกจากกากตะกอนได้ดีขึ้น วิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ การทำให้เข้มข้นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Thickening) และการทำให้เข้มข้นด้วยการลอยตัว (Floating Thickening)

2) การปรับเสถียรของกากตะกอน (Sludge Stabilization) เป็นขั้นตอนการบำบัดที่ทำให้กากตะกอนมีความคงตัว เนื่องจากกากตะกอนชีวภาพที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง มีลักษณะที่ไม่คงตัว ทำให้แยกน้ำออกจากตะกอนได้ยาก การปรับเสถียรของกากตะกอนเป็นการทำให้กากตะกอนอยู่ในรูปที่คงตัวและง่ายต่อการแยกน้ำออกจากกากตะกอน การปรับเสถียรสลัดจ์ทำได้หลายวิธี ทั้งกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Digestion) การปรับเสถียรโดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) และกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การปรับเสถียรด้วยปูนขาว

3) การปรับสภาพกากตะกอน (Sludge Conditioning) เป็นวิธีการที่ช่วยให้การแยกน้ำออกจากกากตะกอนทำได้ง่ายขึ้น วิธีการปรับสภาพกระทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและทางกายภาพ เช่น การเติมสารเคมี (Chemical Conditioning) และการใช้ความร้อน (Thermal Conditioning)

4) การแยกน้ำออกจากกากตะกอน (Sludge Dewatering) เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการทางกายภาพ และการใช้เครื่องจักรกลช่วยแยกเอาน้ำออกจากกากตะกอนจนได้เป็น กากตะกอนแห้ง (Sludge Cake) ซึ่งมีความชื้นประมาณร้อยละ 70-80 ซึ่งการแยกน้ำออกจากกากตะกอนนี้จะทำให้ปริมาตรกากตะกอนที่ต้องกำจัดลดลง วิธีการแยกน้ำออกจากกากตะกอนกระทำได้หลายวิธี เช่น ลานตากกากตะกอน (Sludge Drying Bed) การกรองโดยใช้แรงดัน (Pressure Filter) การกรองโดยการรีดแบบสายพาน (Belt Filter Press) เป็นต้น

5) การกำจัดกากตะกอน (Sludge Disposal) เป็นกระบวนการหลังจากที่ผ่านการบำบัดด้วยขั้นตอนต่างๆ จนมีปริมาตรและปริมาณสารอินทรีย์ลดลงแล้ว เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ โลหะหนัก สารพิษ หรือจุลินทรีย์ที่ยังคงเหลือค้างอยู่ในกากตะกอนอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อมของแหล่งรองรับได้ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการกำจัดที่เหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นตามมาด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การหมักทำปุ๋ย (Composting) การเผา (Incineration) การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) เป็นต้น