

เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและนำกลับคืนทรัพยากร

ระบบบำบัดน้ำเสียจัดเป็นระบบสุขภาพขั้นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับสังคมมนุษย์ ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการแพร่ระบาดของโรคทางน้ำและป้องกันปัญหามลพิษทางน้ำ เทคโนโลยีชีวภาพนับเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากหน้าที่หลักในการบำบัดน้ำเสียแล้ว เทคโนโลยีชีวภาพยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสียตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ซึ่งจะสามารถช่วยแก้ไขปัญหามลพิษและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีแนวโน้มจะทวีความรุนแรงมากขึ้นในอนาคต

ในน้ำเสียนั้นแท้จริงแล้วมีทรัพยากรหลากหลายที่สามารถนำกลับคืนได้ เช่น 1) น้ำสำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ 2) พลังงาน เช่น ก๊าซชีวภาพหรือกระแสไฟฟ้า 3) ธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส และ 4) วัสดุและสารเคมี เช่น พลาสติกชีวภาพ ฯลฯ ในปัจจุบันมุมมองต่อโรงบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment plants, WWTPs) จึงเริ่มเปลี่ยนเป็นโรงนำกลับคืนน้ำและทรัพยากร (water and resource recovery facility, WRRFs)

หนังสือเล่มนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเผยแพร่องค์ความรู้และสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย โดยผู้เขียนได้ผนวกประสบการณ์จากการทำงานวิจัยด้านการใช้เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสียมามากกว่า 10 ปี ไว้ในหนังสือเล่มนี้



จัดพิมพ์โดย
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-3269-70
โทรสาร 0-2218-3547
e-mail: cupress@chula.ac.th
www.cupress.chula.ac.th

สรุควิชาการ สู่สังคม
Knowledge to All



cupress.chula.ac.th

เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำ

ISBN 978-616-593-099-4



ราคา 390.00 บาท

เทคโนโลยีชีวภาพ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย และนำกลับคืนทรัพยากร



เบญจพร สุวรรณศิลป์

เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสีย
และนำกลับคืนทรัพยากร

เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสีย
และนำกลับคืนทรัพยากร

เบญจพร สุวรรณศิลป์

 **สำนักพิมพ์**
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2565

390.-

เบญจพร สุวรรณศิลป์

เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและนำกลับคืนทรัพยากร / เบญจพร สุวรรณศิลป์

1. น้ำเสีย – การบำบัด – เทคโนโลยีชีวภาพ. 2. น้ำ – การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่.

628.35

ISBN (e-book) 978-616-593-232-5

สพจ. Q23/10/2565



สสคคุณค่าวิชาการสู่สังคม

Knowledge to All

www.cupress.chula.ac.th

หนังสือเล่มนี้ผ่านการตรวจคุณภาพวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดทำโดย รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทร. 0-2218-7900 อีเมล : benjaporn.bo@chula.ac.th

ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2565 [CUP6506-036D]

บรรณาธิการอำนวยการ : นางอรทัย นันทนาคิตย

ศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย

กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ : ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนถ บุนนาค

รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธ์ เดชะคุปต์

รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ชำเซ็น

พิสูจน์อักษร : ทศนีย์ ผิวขำ

ออกแบบปก : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ออกแบบรูปเล่ม : รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์

สั่งซื้อได้ที่ : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

<http://www.chulabook.com>

โทร. 08-6323-3703-4

customer@cupress.chula.ac.th, info@cupress.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณนิสิตทุกคนที่เป็นกำลังใจให้ริเริ่มและเขียนหนังสือเล่มนี้จนจบ จากวันที่มีนิสิตแนะนำว่าผู้เขียนควรเขียนหนังสือเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสีย (พ.ศ. 2554) ผู้เขียนได้เริ่มเขียนและทยอยเผยแพร่ส่วนหนึ่งของหนังสือในรูปแบบไฟล์อิเล็กทรอนิกส์แก่นิสิตในชั้นเรียน ซึ่งได้รับคำแนะนำดีชมจากนิสิต เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งได้รับกำลังใจจากนิสิตซึ่งเคยได้ F ในรายวิชาจากการไม่เข้าเรียน ซึ่งในปีถัดมานิสิตก็ยังคงไม่เข้าเรียน แต่สามารถทำคะแนนสอบได้ดีเมื่อสอบถามจึงได้ความว่านิสิตอ่านหนังสือเล่มนี้ (ส่วนที่ 1 พื้นฐาน และส่วนที่ 2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ) จึงเข้าใจเนื้อหาได้อย่างดี ซึ่งเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนเป็นอย่างมากว่าหนังสือเล่มนี้นิสิต นักศึกษาสามารถอ่านเข้าใจได้จริง ๆ และมีกำลังใจในการเขียนหนังสือต่อจนจบ

ผู้เขียนขอขอบคุณนิสิตในที่ปรึกษาทั้งหมดที่ผ่านมาทั้งในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ที่ช่วยกันดำเนินงานวิจัยร่วมกับผู้เขียน และขอขอบพระคุณคณาจารย์และนักวิจัยทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและร่วมทำงานวิจัยกับผู้เขียน ซึ่งผลจากงานวิจัยบางส่วนได้รวบรวมไว้ในหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 ท่านที่ได้รับเชิญจากสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการปรับปรุงหนังสือเล่มนี้ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณอชิรญา แสงเจริญ และ คุณธนภรณ์ ชายหาด ที่ได้ช่วยวาดภาพประกอบหนังสือเล่มนี้ และขอขอบคุณ ดร.กฤตยพงษ์ จันทระเดช และ คุณเศรยา กิจพ่อคำ ที่ช่วยตรวจทานหนังสือเล่มนี้โดยละเอียดในด้านรูปแบบ การอ้างอิง และการใช้คำต่าง ๆ

ผู้เขียนขอขอบคุณโครงการสนับสนุนการเขียนตำรา/หนังสือ/คู่มือ ของคณาจารย์และบุคลากรสายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุน และหนังสือเรื่อง “เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและน้ำกลับคืนทรัพยากร” เล่มนี้ เป็นหนังสือเล่มที่ 33 ในโครงการสนับสนุนการเขียนตำรา/หนังสือ/คู่มือ ของคณาจารย์และบุคลากรสายสนับสนุน คณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือผู้เขียนในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด ทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสเขียนหนังสือเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของผู้เขียนที่ได้ถ่ายทอดความรู้ให้แก่ผู้เขียน ตั้งแต่เด็กจนกระทั่งถึงปัจจุบัน จึงสามารถเรียบเรียงเขียนหนังสือเล่มนี้ได้จนสำเร็จ และผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดา (คุณเอี่ยม บุญชยาอนันต์) มารดา (คุณภาสินี บุญชยาอนันต์) และครอบครัวของผู้เขียนทุกคนที่คอยให้กำลังใจและมอบความรักอย่างไม่มีเงื่อนไขเสมอมา

คำนำผู้เขียน

หนังสือเล่มนี้เกิดขึ้นจากการที่ผู้เขียนเป็นอาจารย์สอนรายวิชาวิศวกรรมน้ำเสียและการออกแบบ และรายวิชาทฤษฎีและการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสูง ซึ่งเป็นรายวิชาบังคับสำหรับนิสิตสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท ทั้งนี้ผู้เขียนพบปัญหาว่าตำราภาษาอังกฤษประจำรายวิชาที่มีเนื้อหาครบถ้วนและสมบูรณ์ที่สุดนั้นมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นพันหน้าในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา ซึ่งเกิดจากการแก้ไขเพิ่มเติมเนื้อหา และตีพิมพ์หลายครั้ง ส่งผลให้นิสิตจำนวนน้อยมากที่สามารถอ่านตำรานั้นได้จริง อีกทั้งค่อนข้างมีความยากในการสกัดเนื้อหาที่จำเป็นต้องเข้าใจจริง ๆ จากหนังสือที่มีความหนาเช่นนั้น ผู้เขียนจึงมีความต้องการอยากให้หนังสือที่นิสิตมีกำลังใจในการอ่าน และสามารถอ่านจบได้จริง ประกอบการเรียนการสอน จึงเป็นที่มาของหนังสือเล่มนี้ที่มุ่งหวังให้นิสิต นักศึกษา วิศวกรสิ่งแวดล้อม และผู้สนใจ สามารถอ่านจบได้ และเข้าใจได้ง่าย โดยหนังสือเล่มนี้เน้นปูพื้นฐานความเข้าใจทั้งหมดเกี่ยวกับเนื้อหา โดยรายละเอียดปลีกย่อยบางส่วนอาจไม่ครบถ้วนเท่าหนังสือในลักษณะของคู่มือ (handbook) ซึ่งไม่ใช่วัตถุประสงค์ของหนังสือเล่มนี้

นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้ผนวกแนวคิดล่าสุดเกี่ยวกับมุมมองต่อน้ำเสีย โดยใช้ให้เห็นว่าน้ำเสียเป็นทรัพยากรที่สำคัญในเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) โดยผู้เขียนเล็งเห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียในอนาคตจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อนำกลับคืนทรัพยากร (resource recovery) จากน้ำเสีย เช่น น้ำสะอาด พลังงาน ธาตุอาหาร และวัสดุ ควบคู่กับการบำบัดน้ำเสีย และแนวคิดดังกล่าวควรเป็นที่กล่าวถึงในวงกว้างสำหรับนิสิตและนักศึกษาด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ระดับชั้นปริญญาตรี จากประสบการณ์การทำงานวิจัยด้านการใช้เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย (biotechnology for resource recovery from wastewater) ของผู้เขียนมากกว่า 10 ปี ซึ่งครอบคลุมด้านการผลิตพลาสติกชีวภาพ (bioplastics) จากน้ำเสีย การนำกลับคืนพลังงานจากน้ำเสียผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (microbial fuel cell) และกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic wastewater treatment process) การนำกลับคืนธาตุอาหารจากน้ำเสีย (nutrient recovery) ในรูปสตรูไวท์ (struvite) สำหรับเป็นปุ๋ย โดยใช้แบคทีเรียช่วยใน

การละลายสำหรับการใช้งาน รวมถึงงานวิจัยเชิงบูรณาการหลายศาสตร์ (multidisciplinary research) ของการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (water reuse) ทำให้ผู้เขียนได้เห็นภาพรวมของการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย และได้ถ่ายทอดองค์ความรู้ ความเข้าใจ และประสบการณ์ไว้ในหนังสือเล่มนี้

ผู้เขียนเชื่อว่าเทคโนโลยีต่าง ๆ ทางสิ่งแวดล้อมจะยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และย่อมจะมีกระบวนการและเทคโนโลยีใหม่ ๆ เกิดขึ้นอีกมากมายในอนาคต ซึ่งเราคงต้องเรียนรู้และศึกษาต่อไปโดยอาศัยพื้นฐานและความเข้าใจที่ถูกต้องเป็นส่วนสำคัญ โดยผู้เขียนเชื่อว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนิสิต นักศึกษา วิศวกรสิ่งแวดล้อม และผู้สนใจด้านเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและนำกลับคืนทรัพยากรทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการวางพื้นฐานความเข้าใจที่ถูกต้องให้กับผู้อ่าน และผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะสามารถช่วยก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดการน้ำเสียในประเทศไทยได้ในอนาคต

อนึ่ง เนื่องจากเนื้อหาของหนังสือเล่มนี้มีคำศัพท์ที่มาจากภาษาอังกฤษค่อนข้างมาก ผู้เขียนจึงได้รวบรวมคำแปลของศัพท์ภาษาอังกฤษทั้งหมดที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้ไว้ในอภิธานศัพท์ (glossary) ในด้านท้ายของหนังสือ ซึ่งผู้เขียนพยายามแปลคำศัพท์ภาษาอังกฤษโดยอ้างอิงตามศัพท์บัญญัติราชบัณฑิตยสถาน และคลังศัพท์ไทยของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยในบางกรณีอาจใช้การแปลคำศัพท์เองหรือใช้คำทับศัพท์ร่วมด้วย ทั้งนี้ผู้เขียนพยายามเลือกใช้คำที่สื่อความหมายได้ดีที่สุดในบริบทของเนื้อหาเท่าที่จะเป็นไปได้ และอาจมีการแสดงคำศัพท์ภาษาอังกฤษในวงเล็บซ้ำหลายครั้งสำหรับบางคำในกรณีที่มีการกล่าวถึงในบทอื่น ๆ อีกเพื่อให้แน่ใจว่าผู้อ่านไม่สับสนคำศัพท์ภาษาอังกฤษเหล่านั้น นอกจากนี้ สำหรับเนื้อหาเกี่ยวกับการคำนวณและตัวอย่างที่มีการแสดงวิธีการคำนวณ ผู้เขียนเลือกที่จะคงคำศัพท์ภาษาอังกฤษและตัวแปรไว้ ซึ่งเหมาะสมกับการคำนวณและลดความสับสนที่อาจเกิดจากการแปล

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

คำนำผู้เขียน

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1

ส่วนที่ 1 ความรู้พื้นฐาน

9

บทที่ 2 น้ำเสีย การบำบัดน้ำเสีย และการนำกลับคืนทรัพยากร

11

บทที่ 3 จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อมและกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

35

บทที่ 4 ปริมาณสัมพันธ์ของกระบวนการทางชีวภาพ

61

บทที่ 5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการจุลชีพและประเภทของปฏิกิริยา

93

ส่วนที่ 2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

133

บทที่ 6 กระบวนการแยกทิวเต็ดสลัดจ์

135

บทที่ 7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

191

บทที่ 8 การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

229

ส่วนที่ 3 เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย

259

บทที่ 9 การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

261

บทที่ 10 การนำกลับคืนพลังงานจากน้ำเสียโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

281

บทที่ 11 การผลิตพลาสติกชีวภาพจากน้ำเสีย

315

บทที่ 12 การนำกลับคืนธาตุอาหารจากน้ำเสีย

343

	หน้า
ภาคผนวก	359
อภิธานศัพท์	367
ประวัติผู้เขียน	393

บทที่ 1

บทนำ

Introduction

การบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment) ถือเป็นหน้าที่ความรับผิดชอบโดยตรงของ วิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ระบบบำบัดน้ำเสียจัดเป็นระบบสุขาภิบาลขั้นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับ สังคมมนุษย์ ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการแพร่ระบาดของโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคทางน้ำ (waterborne disease) อีกทั้งยังช่วยป้องกันปัญหามลพิษทางน้ำ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของแหล่งน้ำ ระบบนิเวศ และสิ่งแวดล้อม

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพนับเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับการบำบัดน้ำเสียทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก ซึ่งมีข้อดีที่สำคัญ คือ ประสิทธิภาพในการ บำบัดที่คุ้มกับค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากหน้าที่หลักในการบำบัดน้ำเสียแล้ว กระบวนการทางชีวภาพยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการนำกลับคืนทรัพยากร (resource recovery) จากน้ำเสีย ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน หรืออาจเฉพาะเจาะจงลงไป คือ เศรษฐกิจ ชีวภาพหมุนเวียน (circular bioeconomy) (Stegmann et al., 2020) หรือในประเทศไทยอาจจัด อยู่ในแนวคิดการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (bio-circular-green economy, BCG economy) (กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, 2565) โดยเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสียสอดคล้องอย่างมากกับแนวคิด เหล่านี้ ซึ่งจะสามารถช่วยแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำและทรัพยากรที่มีแนวโน้มจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ในอนาคต จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change)

ในน้ำเสียนั้นแท้จริงแล้วมีทรัพยากรที่สามารถนำกลับคืนได้ เช่น น้ำสำหรับการนำน้ำกลับมา ใช้ใหม่ (water reuse) พลังงานจากก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่ผลิตได้จากกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ อากาศ หรือกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (microbial fuel cells) ธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส จากน้ำเสียซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ย และวัสดุและสารเคมี เช่น พลาสติกชีวภาพ (bioplastics) ไฮโดรเจน และกรดอินทรีย์ ซึ่งสามารถผลิตได้จากสารอินทรีย์ ในน้ำเสีย ในปัจจุบันมุมมองต่อโรงบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment plants, WWTPs) จึงเริ่ม เปลี่ยนเป็นโรงนำกลับคืนน้ำและทรัพยากร (water and resource recovery facility, WRRFs)

เพื่อนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสียกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งจะสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากมลพิษทางน้ำ พร้อมทั้งลดปัญหาการขาดแคลนทรัพยากร ได้แก่ น้ำ พลังงาน และแร่ธาตุ ได้ในคราวเดียวกัน

ในปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณน้ำเสียชุมชนเฉลี่ยวันละ 10.3 ล้าน ลบ.ม./วัน แต่สัดส่วนการนำเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยรวมยังคงน้อยมากคือประมาณร้อยละ 31 ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำเสื่อมโทรม ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยของประชาชน จึงได้มีการตั้งเป้าหมายในการเพิ่มจำนวนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อขยายการรับน้ำเสียชุมชนให้ครอบคลุมถึงร้อยละ 57 ภายในปี 2580 ในแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ, 2562) ซึ่งถือเป็นแผนนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศไทย ที่จำเป็นต้องใช้บุคลากรผู้เชี่ยวชาญและองค์ความรู้ด้านการบำบัดน้ำเสียในการขับเคลื่อน

ในส่วนของสถานการณ์การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทย ปัจจุบันมีองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในประเทศไทยจำนวน 47 แห่ง จากทั้งหมด 7,850 แห่ง ที่ได้มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น รดน้ำต้นไม้ ล้างพื้นถนน ล้างตลาด ล้างรถเก็บขยะ ล้างท่อน้ำทิ้ง ใช้ด้านการเกษตร และสำรองไว้ใช้ดับเพลิง ในขณะที่ในภาคอุตสาหกรรม พบว่าปัจจุบันมีนิคมอุตสาหกรรมที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นน้ำใช้เพื่ออุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีการบำบัดขั้นสูง เช่น รีเวิร์สออสโมซิส จำนวน 6 แห่ง จากทั้งหมด 30 แห่งที่ได้ทำการรวบรวมข้อมูล (จากนิคมอุตสาหกรรมจำนวนทั้งหมด 59 แห่งในประเทศไทย) (เบญจพร สุวรรณศิลป์ และคณะ, 2563) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในภาพรวมนั้น การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทยยังอยู่ในวงจำกัด แต่จะมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีแนวโน้มประสบปัญหาขาดแคลนน้ำในอนาคต เช่น พื้นที่ในเขตระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor, EEC) ซึ่งครอบคลุมจังหวัดระยอง ชลบุรี และฉะเชิงเทรา

สำหรับสถานการณ์การนำกลับทรัพยากรจากน้ำเสียในประเทศไทยนั้น ปัจจุบันจะมุ่งเน้นที่การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียเป็นหลัก โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียและของเสีย

ในประเทศไทยรวมทั้งหมด คือ ประมาณ 1,405 ล้าน ลบ.ม.ปกติต่อปี (Nm^3/y) จากศักยภาพทั้งหมด 18,700 ล้าน ลบ.ม.ปกติต่อปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2565) คิดเป็นร้อยละ 7.5 ซึ่งยังมีศักยภาพในการพัฒนาเพิ่มขึ้นได้อีกมาก ในขณะที่การนำกลับคืนทรัพยากรอื่น ๆ จากน้ำเสีย เช่น ธาตุอาหาร วัสดุ หรือสารเคมี ยังไม่มีการรวบรวมข้อมูลที่ชัดเจน แต่คาดว่าจะยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด

จากมุมมองในปัจจุบันที่เปลี่ยนแปลงไปต่อน้ำเสียและระบบบำบัดน้ำเสีย และช่องว่างในการพัฒนาด้านการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสียในประเทศไทย การพัฒนาเทคโนโลยี รวมถึงการถ่ายทอดประสบการณ์และองค์ความรู้ด้านการบำบัดน้ำเสียและนำกลับคืนทรัพยากรจึงมีความสำคัญอย่างมาก

หนังสือเล่มนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและนำกลับคืนทรัพยากร โดยเนื้อหาในหนังสือจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ **ส่วนที่ 1 ความรู้พื้นฐาน** จะกล่าวถึงภาพรวมของระบบบำบัดน้ำเสียและการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย รวมไปถึงความรู้พื้นฐานทางจุลชีววิทยาและกระบวนการทางชีวภาพ สำหรับผู้อ่านที่มีพื้นฐานดีแล้วสามารถข้ามส่วนที่ 1 ไปยังส่วนที่ 2 ได้เลย สำหรับใน **ส่วนที่ 2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ** กล่าวถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพประเภทต่าง ๆ เช่น กระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ (activated sludge process) กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic wastewater treatment process) และการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (biological nitrogen and phosphorus removal) และใน **ส่วนที่ 3 เทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย** มีเนื้อหาครอบคลุมการนำกลับคืนทรัพยากรประเภทต่าง ๆ จากน้ำเสียทั้งในรูปแบบของน้ำสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ พลังงาน ธาตุอาหาร และวัสดุ โดยแต่ละบทของหนังสือมีเนื้อหาร้อยเรียงตามลำดับ ดังนี้

บทที่ 2 ของหนังสือเล่มนี้กล่าวถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงมลพิษที่สามารถบำบัดได้ในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ และแนวคิด

การนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย เพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับคืนทรัพยากรในภาพรวม อย่างไรก็ตาม รายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการบำบัดทางกายภาพและเคมีต่าง ๆ จะไม่ครอบคลุมอยู่ในหนังสือเล่มนี้ แต่จะกล่าวถึงเพื่อให้เห็นภาพรวมของระบบเท่านั้น

ใน **บทที่ 3** จะทบทวนความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับจุลชีววิทยาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม การนำความรู้ทางจุลชีววิทยามาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเชื่อมโยงกระบวนการทางชีวภาพให้สามารถแสดงออกมาในเชิงปริมาณ การแปลงความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการทางชีวภาพออกมาในเชิงปริมาณจึงเป็นจุดสำคัญของการออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อปริมาณสัมพันธ์ของกระบวนการทางชีวภาพใน **บทที่ 4**

โดยทั่วไปแล้วนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียมักกระทำในถังบำบัดหรือปฏิกรณ์ (reactor) ความรู้ทางด้านปฏิกรณ์ประเภทต่าง ๆ และสมดุลมวลของระบบ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเนื้อหาดังกล่าวนี้ได้รวบรวมไว้ใน **บทที่ 5** นอกจากนี้ ในบทที่ 5 ยังกล่าวถึงอัตราการเติบโตของจุลินทรีย์ อัตราการใช้สารอาหาร อัตราการย่อยสลายตัวเอง ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่ากระบวนการทางชีวภาพนั้นเกิดขึ้นได้ช้าหรือเร็ว และเป็นข้อมูลสำคัญที่เชื่อมโยงกับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของถังบำบัด

ในลำดับถัดมาจะเข้าสู่ส่วนที่ 2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดย **บทที่ 6** จะเป็นการเชื่อมโยงเนื้อหาจากบทที่ 4 และบทที่ 5 มาสร้างเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ ซึ่งโมเดลทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถช่วยในการคำนวณออกแบบขนาดของระบบบำบัดแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ และยังช่วยในการควบคุมระบบได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังกล่าวถึงประเภทของกระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ และปัญหาที่มักพบ ส่วนใน **บทที่ 7** จะกล่าวถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งเชื่อมโยงถึงการนำกลับคืนพลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพ โดยกล่าวถึงรูปแบบของปฏิกรณ์ต่าง ๆ ของระบบไม่ใช้อากาศ รวมถึงตัวอย่างการ

ออกแบบระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ สำหรับ **บทที่ 8** จะกล่าวถึงการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

จากนั้นจึงเข้าสู่กลุ่มเนื้อหาด้านการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสีย โดยใน **บทที่ 9** จะกล่าวถึงการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งน้ำสะอาดถือเป็นทรัพยากรสำคัญที่สามารถนำกลับคืนได้จากน้ำเสีย สำหรับการนำกลับคืนพลังงานจากน้ำเสียนั้น ส่วนหนึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 7 ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งให้ผลผลิตออกมาเป็นก๊าซชีวภาพ สำหรับอีกส่วนหนึ่งจะอยู่ใน **บทที่ 10** ซึ่งกล่าวถึงการนำกลับคืนพลังงานจากน้ำเสียโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จากนั้นใน **บทที่ 11** จะมีเนื้อหาเกี่ยวกับการผลิตพลาสติกชีวภาพจากน้ำเสีย ซึ่งถือได้ว่าช่วยเพิ่มความหลากหลายของทรัพยากรที่สามารถผลิตได้จากน้ำเสีย อีกทั้งยังสามารถช่วยแก้ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อีกทางหนึ่งด้วย และในบทสุดท้าย คือ **บทที่ 12** จะมีเนื้อหาเกี่ยวกับการนำธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ในรูปของปุ๋ย โดยผ่านการตกตะกอนเป็นแร่สูตรไวท์สำหรับใช้เป็นปุ๋ย หรือผ่านการนำน้ำที่ยังคงมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ไปใช้เพื่อรดน้ำต้นไม้ สำหรับเนื้อหาในส่วนของการนำกลับคืนทรัพยากรจากน้ำเสียนั้น เทคโนโลยีบางส่วนยังอยู่ในระหว่างการวิจัยและพัฒนา ซึ่งอาจยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันทีในปัจจุบัน แต่ล้วนเป็นประเด็นที่น่าสนใจและมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับวิศวกรสิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2565, เมษายน 26). ระบบสารสนเทศและฐานข้อมูลเพื่อติดตาม และประเมินผลการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศ. สืบค้นจาก http://biogas.dede.go.th/biogas/web_biogas/
2. กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. (2565). แผนปฏิบัติการด้านการขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศไทยด้วยโมเดลเศรษฐกิจ BCG พ.ศ. 2564-2570.
3. เบญจพร สุวรรณศิลป์, ปิยธิดา เรืองรัมย์, จตุวัฒน์ แสงสานนท์, วีรยา อินทรบุตร และกิตติยา เสนาวงค์. (2563ข). *ทิศทางนโยบายและงานวิจัยเพื่อขับเคลื่อนการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทย*. [ม.ป.ท.]: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ฝ่ายสวัสดิภาพสาธารณะ.
4. สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ. (2562). แผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580). สืบค้นจาก <http://www.onwr.go.th/wp-content/uploads/2019/09/แผนแม่บทน้ำ20-ปี-A4-Final.pdf/>
5. Stegmann, P., Londo, M., Junginger, M. (2020). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100029.

ส่วนที่ 1
ความรู้พื้นฐาน

บทที่ 2

น้ำเสีย การบำบัดน้ำเสีย และการนำกลับคืนทรัพยากร

Wastewater, Wastewater Treatment, and Resource Recovery

2.1 น้ำเสีย (wastewater)

น้ำเสีย คือ น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารต่าง ๆ ที่ไม่เป็นที่ต้องการ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำได้เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ มีแนวโน้มส่งผลให้คุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำเสื่อมโทรมลง มลพิษเหล่านี้อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ ตัวอย่างเช่น สารอินทรีย์ หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะสามารถส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ก่อให้เกิดน้ำเน่าเสียและส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ อีกทั้งถ้าเป็นไนโตรเจนและฟอสฟอรัส หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสามารถก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างรวดเร็ว (algal bloom) นำไปสู่ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน นอกจากนี้ สารพิษ เช่น โลหะหนัก หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสามารถเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศในน้ำได้

สาเหตุสำคัญของมลพิษทางน้ำมักเกิดจากการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้รับการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำ ประเภทของน้ำเสียสามารถแบ่งได้ด้วยเกณฑ์การแบ่งต่าง ๆ เช่น อาจแบ่งตามประเภทของแหล่งกำเนิด เช่น น้ำเสียบ้านเรือน (domestic wastewater) น้ำเสียอุตสาหกรรม (industrial wastewater) และน้ำเสียจากการเกษตรกรรม (agricultural wastewater) ซึ่งน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกันก็มักจะมีองค์ประกอบของสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียแตกต่างกัน นอกจากนี้ ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียนั้นสามารถอธิบายโดยแบ่งเป็นหมวดหมู่ (Metcalf & Eddy, 2014) ได้ดังนี้

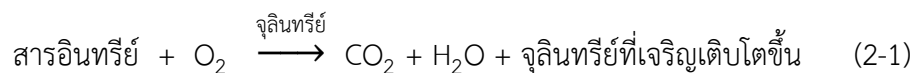
- 1) ลักษณะเฉพาะทางกายภาพ (physical characteristics) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น สี ความขุ่น อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าการส่องผ่านของแสง และของแข็งชนิดต่าง ๆ ในน้ำ เช่น ของแข็งทั้งหมด (total solid, TS) ของแข็งแขวนลอย (suspended solid, SS) ของแข็งละลาย (dissolved solid, DS) และของแข็งแขวนลอยระเหย (volatile suspended solid, VSS)

- 2) ลักษณะเฉพาะทางเคมีอนินทรีย์ (inorganic chemical characteristics) เช่น พีเอช (pH) สภาพด่าง (alkalinity) ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen, DO) และโลหะหนักต่าง ๆ
- 3) ลักษณะเฉพาะทางเคมีอินทรีย์ (organic chemical characteristics) โดยทั่วไปสามารถวัดหรือสื่อถึงปริมาณสารอินทรีย์โดยรวมด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี หรือ บีโอดี (biochemical oxygen demand, BOD) ความต้องการออกซิเจนทางเคมี หรือ ซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) ความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎี (theoretical oxygen demand, ThOD) และ คาร์บอนอินทรีย์รวม หรือ ทีโอซี (total organic carbon, TOC) นอกจากนี้ยังอาจมีการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์เฉพาะสารที่สนใจได้
- 4) ลักษณะเฉพาะทางชีววิทยา (biological characteristics) ในน้ำเสียอาจมีการปนเปื้อนด้วยจุลชีพต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย (bacteria) ไวรัส (virus) สาหร่าย (algae) โปรโตซัว (protozoa) ดังนั้นจึงอาจมีการวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของจุลชีพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มแบคทีเรียตัวบ่งชี้จากอุจจาระ (fecal indicator bacteria) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการปนเปื้อนจากอุจจาระ และมีแนวโน้มเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคติดต่อทางเดินอาหารและน้ำ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (total coliform bacteria) ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (fecal coliform bacteria) และ อี โคไล (*Escherichia coli*, *E. coli*)

ในที่นี้จะขอไม่กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับมลพิษและพารามิเตอร์ทั้งหมดเหล่านี้ อย่างไรก็ตามจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สื่อถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ ได้แก่ บีโอดี ซีโอดี และความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎี ซึ่งมีความจำเป็นต้องนำไปใช้งานอย่างมากในด้านเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับคืนทรัพยากร

บีโอดี (biochemical oxygen demand, BOD)

บีโอดี คือ ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี ซึ่งหมายถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไปเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง การวิเคราะห์ค่าบีโอดีจึงทำได้โดยการวัดปริมาณออกซิเจนที่ลดลง ตัวอย่างเช่น บีโอดี₅ (BOD₅) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนในน้ำตัวอย่างที่ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 วัน ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ลดลงหรือค่าความต้องการออกซิเจนนี้จะสื่อถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ หากในน้ำมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่สูงก็ย่อมจะมีค่าความต้องการออกซิเจนสูงด้วย การย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนสามารถแสดงได้โดยคร่าวดังสมการที่ 2-1



การย่อยสลายของสารอินทรีย์นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (first-order kinetics) (Metcalf & Eddy, 2014) ดังนี้

$$\frac{dBOD_r}{dt} = -k_1 BOD_r$$

จะได้ว่า
$$BOD_r = BOD_{r,initial}(e^{-k_1 t})$$

โดยที่

BOD_r = ปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่เป็นเวลาใด ๆ ในหน่วยของสมมูลออกซิเจน (oxygen equivalent) (มก./ล.)

$BOD_{r,initial}$ = ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นในหน่วยของสมมูลออกซิเจน (มก./ล.)

k_1 = ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (วัน⁻¹)

t = เวลาใด ๆ (วัน)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงความต้องการออกซิเจนสะสมที่ช่วงเวลาใด ๆ (BOD_t) ซึ่งเมื่อเริ่มต้นการทดลองวัดบีโอดีนั้นความต้องการออกซิเจนเริ่มต้นจะเป็น 0 เนื่องจากยังไม่มีการใช้ออกซิเจน จากนั้นค่าความต้องการออกซิเจนสะสมจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป ตรงกันข้ามกับปริมาณสารอินทรีย์ซึ่งจะค่อย ๆ มีค่าลดลง แนวโน้มของกราฟ BOD_r และ BOD_t จึงมีลักษณะตรงกันข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2-1 และเมื่อสังเกตหน่วยของทั้ง BOD_r และ BOD_t จะเห็นได้ว่าทั้งคู่นั้นมีหน่วยเดียวกัน คือเป็นหน่วยสมมูลออกซิเจนทั้งคู่ จึงสามารถแสดงในแกนเดียวกันได้ และสามารถบวกกันได้โดยตรง ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าที่เวลาใด ๆ $BOD_r + BOD_t$ จะมีค่าคงที่เสมอซึ่งเท่ากับค่า BOD_r เริ่มต้น ($BOD_{r,initial}$) และเท่ากับค่า BOD_t สูงสุด หรือคือบีโอดีท้ายสุด (ultimate BOD, UBOD) นั่นเอง

กล่าวคือ
$$BOD_{r,initial} = UBOD = BOD_r + BOD_t$$

โดยที่

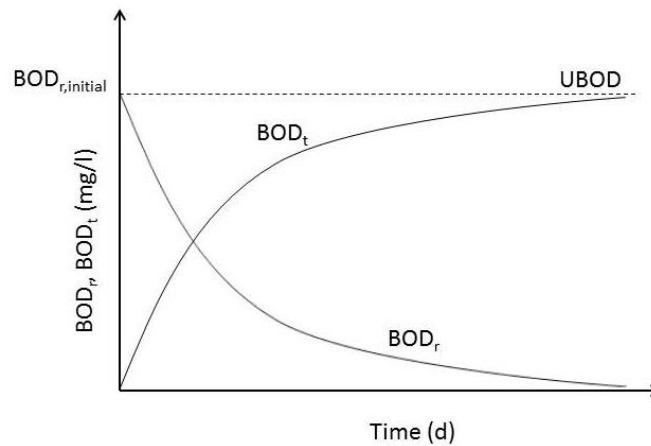
$$BOD_t = \text{บีโอดีเมื่อผ่านไป } t \text{ วัน (มก./ล.)}$$

$$UBOD = \text{บีโอดีท้ายสุด (ultimate BOD, UBOD) (มก./ล.)}$$

ดังนั้น
$$BOD_t = UBOD - BOD_r$$

$$BOD_t = UBOD - UBOD(e^{-k_1 t})$$

จะได้ว่า
$$BOD_t = UBOD (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-1 บีโอดีที่เวลาใด ๆ อธิบายโดยจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง

บีโอดีท้ายสุดแท้จริงแล้วเป็นค่าเชิงทฤษฎี คือ เป็นค่า BOD_t เมื่อระยะเวลาผ่านไบนานมาก ($t \rightarrow \infty$) ซึ่งค่านี้จะใกล้เคียงกับซีโอดีที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable COD) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไบนานมาก ๆ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพทั้งหมดรวมถึงจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นก็จะถูกย่อยสลายไปทั้งหมดด้วยโดยการใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ค่าความต้องการออกซิเจนทั้งหมดใกล้เคียงกับซีโอดีที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (k_1) นั้นโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 0.23 วัน^{-1} ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Metcalf & Eddy, 2014) แต่จะมีค่าสูงขึ้นได้ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังสมการที่ 2-3

$$k_{1,T} = k_{1,20} \theta^{(T-20)} \quad (2-3)$$

โดยที่

$k_{1,20}$ = ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (d^{-1}) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

$k_{1,T}$ = ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (d^{-1}) ที่อุณหภูมิ T

T = อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

θ = ค่าคงที่ในการแปรผันของอุณหภูมิ

สำหรับช่วง 20-30 องศาเซลเซียส $\theta = 1.056$ และสำหรับช่วง 4-20 องศาเซลเซียส $\theta = 1.135$ (Metcalf & Eddy, 2014)

สำหรับการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปแล้วจะนิยามวิเคราะห์และรายงานค่า BOD ที่ 5 วัน คือ บีโอดี₅ (BOD₅) ในหน่วยของ มก./ล.

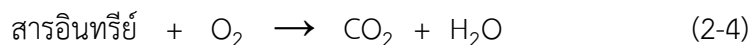
ซีโอดี (chemical oxygen demand, COD)

โดยทั่วไปแล้วนั้นสารอินทรีย์มีความต้องการออกซิเจนอยู่เสมอ เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองในสภาวะปกติ แต่จำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวหรือต้องมีสภาวะบางอย่างที่เหมาะสม ในกรณีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวก็คือจุลินทรีย์ ซึ่งนำมาใช้เป็นหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพหรือบีโอดีดังที่กล่าวไปแล้ว

นอกจากนี้ สารอินทรีย์ทั่วไปเมื่อถูกเผาไหม้ (combustion) ก็มีความต้องการออกซิเจนเช่นเดียวกัน ในกรณีนี้ความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับออกซิเจน ซึ่งปริมาณออกซิเจนดังกล่าวนี้ก็คือความต้องการออกซิเจนทางเคมีของสารอินทรีย์นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ คงเป็นไปได้ยากมากที่จะเผาไหม้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเพื่อวิเคราะห์ค่าความต้องการออกซิเจนโดยตรง จึงได้มีการคิดค้นวิธีการวิเคราะห์ความต้องการออกซิเจนในทางเคมี ซึ่งก็คือ ซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ โดยใช้ตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) เช่น ไดโครเมต (dichromate, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดส์สูงเป็นสารทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์แทนออกซิเจน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณไดโครเมตที่ใช้ไปเพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ แล้วแปลงค่าที่ได้ให้เป็นค่าเทียบเท่ากับปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ดังกล่าวในน้ำ ซึ่งค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (ซีโอดี) ที่วัดได้นี้จะสื่อถึงความเข้มข้นของ

สารอินทรีย์ในน้ำ หากซีโอดีมีค่าสูงก็จะสื่อถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำที่สูง การวิเคราะห์ซีโอดีมีข้อดีที่สำคัญคือสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว (ประมาณ 3 ชม.) เมื่อเทียบกับบีโอดีซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานถึง 5 วัน

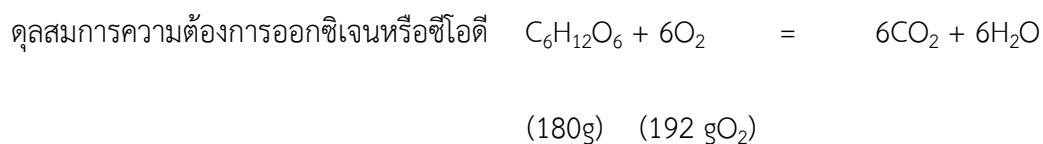
ในทางตรงกันข้าม หากเราทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำก็ย่อมสามารถคำนวณซีโอดีได้เช่นกันดังสมการที่ 2-4 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเป็นสมการเช่นเดียวกับสมการแสดงปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion reaction) ของสารอินทรีย์นั่นเอง อย่างไรก็ตาม การใช้สมการดังกล่าวจำเป็นต้องดุลสมการให้ถูกต้อง จากนั้นจึงคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์โดยใช้หลักการปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometry) ดังแสดงในตัวอย่างที่ 2-1



ตัวอย่างที่ 2-1 จงคำนวณความเข้มข้นซีโอดี ของ 300 มก./ล.ของกลูโคส (glucose)

วิธีทำ

กลูโคส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, MW) = 180 กรัม/โมล



$$\text{ดังนั้น กลูโคสมีความเข้มข้นซีโอดี เท่ากับ } 300 \text{ mg/l} \times \frac{192 \text{ gCOD}}{180 \text{ g}} = 320 \text{ mgCOD/l}$$

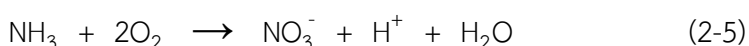
โดยทั่วไปแล้วแม้แต่ในกรณีของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable organic compounds) ซีโอดีย่อมมีค่าสูงกว่าบีโอดีเสมอ เนื่องจากในกระบวนการทางชีวภาพซึ่งให้ค่าความต้องการออกซิเจนเป็นค่าบีโอดี สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์

สารอินทรีย์ส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจริง ๆ ซึ่งสื่่อออกมาในค่าความต้องการออกซิเจนจึงมีค่าน้อยกว่าในกระบวนการทางเคมีซึ่งสารอินทรีย์ทั้งหมดจะถูกทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (หรือทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดส์ตัวอื่นแทนออกซิเจน ในกรณีของการวัดซีโอดี) รายละเอียดในส่วนของการใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์และการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เพื่อสร้างพลังงานในกระบวนการทางชีวภาพจะอธิบายโดยละเอียดในบทที่ 4 นอกจากนี้ สำหรับสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่วนดังกล่าวก็จะไม่สามารถวัดออกมาได้ด้วยบีโอดี แต่จะปรากฏได้ในซีโอดีซึ่งอาศัยตัวออกซิไดส์ที่มีความสามารถสูงในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเหล่านั้นก็จะยังส่งผลให้ซีโอดีมีค่าสูงมากกว่าบีโอดี₅ ขึ้นไปอีก

ค่าความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎี (theoretical oxygen demand, ThOD)

ค่าความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎี (ThOD) เป็นค่าความต้องการออกซิเจนทั้งหมดซึ่งเกิดขึ้นจากทั้ง 2 ส่วนคือ

- 1) ความต้องการทางออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมี (ซีโอดี) ดังสมการที่ 2-4
- 2) ความต้องการออกซิเจนเพื่อเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) ซึ่งเปลี่ยนรูปแอมโมเนียเป็นไนเตรต (nitrogenous oxygen demand, NOD) ดังสมการที่ 2-5

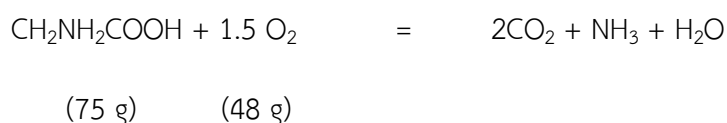


ดังนั้น
$$\text{ThOD} = \text{COD} + \text{NOD} \quad (2-6)$$

กล่าวคือค่าความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎีจะรวมความต้องการออกซิเจนที่ใช้ในสมการที่ 2-4 และ 2-5 ดังตัวอย่างที่ 2-2 สำหรับในกรณีที่สารอินทรีย์นั้นไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน NOD จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\text{NOD} = 0$) และค่าความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎีก็จะมีค่าเท่ากับซีโอดีนั่นเอง

ตัวอย่างที่ 2-2 จงคำนวณหาความต้องการออกซิเจนเชิงทฤษฎี (ThOD) ของไกลซีน (glycine, $\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$) 500 มก./ล.

วิธีทำ



ดังนั้น $\text{COD} = 500 \text{ mgCH}_2\text{NH}_2\text{COOH/l} \times 48 \text{ gCOD/75 gCH}_2\text{CHNH}_2\text{COOH} = 320 \text{ mgCOD/l}$



(64 g)

Glycine 75 g $\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$ ให้ NH_3 1 mol ซึ่งมีค่า NOD = 64 g NOD

ดังนั้น $\text{NOD} = 500 \text{ mg CH}_2\text{NH}_2\text{COOH /l} \times 64 \text{ g NOD/75 g CH}_2\text{CHNH}_2\text{COOH} = 427 \text{ mgNOD/l}$

ดังนั้น $\text{ThOD} = \text{COD} + \text{NOD} = 320 + 427 = 747 \text{ mgThOD/l}$

นอกเหนือจากสารมลพิษและพารามิเตอร์ที่กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ในปัจจุบันยังมีสารมลพิษอุบัติ (emerging pollutants) ที่ถึงแม้จะเพิ่งเกิดขึ้นในระยะเวลาไม่นาน แต่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และสาธารณสุข ตัวอย่างสารเหล่านี้ เช่น ยาตกค้าง (pharmaceutical residues) ผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล (personal care products) และสารเคมีที่ใช้ในครัวเรือน (household chemicals) ฮอร์โมนและยาปฏิชีวนะในน้ำเสียจากปศุสัตว์และฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืชจากเกษตรกรรม และสารเคมีอันตรายบางชนิดจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ยีนดื้อยาปฏิชีวนะ (antibiotic-resistance genes, ARGs) ไมโครพลาสติก (microplastics) และนาโนพลาสติก (nanoplastics) (Bartelt-Hunt et al., 2011; Margot et al., 2015; Karkman et al., 2018; Zhang et al., 2022) ซึ่งสารมลพิษเหล่านี้ แม้มีปริมาณเพียง

เล็กน้อย อาจเรียกว่าสารมลพิษความเข้มข้นต่ำ (micropollutants) แต่สามารถส่งผลกระทบได้อย่างกว้างขวาง สารมลพิษอุบัติเหล่านี้ถือว่าเป็นประเด็นที่กระบวนการบำบัดน้ำเสียและการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเช่นกัน

2.2 การบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหน้าที่หลักเพื่อกำจัดมลพิษต่าง ๆ เนื่องจากในน้ำเสียมักจะมีองค์ประกอบของมลพิษและสารต่าง ๆ อยู่อย่างหลากหลาย ดังนั้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องมีขั้นตอนการบำบัดมากกว่า 1 ขั้นตอนเพื่อกำจัดมลพิษต่าง ๆ อย่างครบถ้วน และอาจจำเป็นต้องมีการปรับสภาวะบางอย่างให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการบำบัดในขั้นต่อไป ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทตามกลไกการบำบัดได้ ดังนี้

- 1) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (physical treatment process) อาศัยกลไกทางกายภาพในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ตะแกรง (screen) ถังตกกรวดทราย (grit chamber) ถังดักไขมัน (grease trap) ถังตกตะกอนชั้นที่หนึ่ง (primary sedimentation) ถังกรอง (filter) ถังลอยตะกอนแบบอากาศละลาย (dissolved air flotation) ฯลฯ
- 2) กระบวนการบำบัดทางเคมี (chemical treatment process) อาศัยกลไกทางเคมีในการบำบัดน้ำเสีย เช่น การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) กระบวนการรีดักชัน (reduction process) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation process) การสะเทิน (neutralization) การเติมคลอรีน (chlorination) ฯลฯ
- 3) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมี (physico-chemical treatment process) อาศัยกลไกทั้งทางกายภาพและเคมีในการบำบัด เช่น กระบวนการดูดซับ (adsorption process) การจับก้อน-การรวมกลุ่มตะกอน (coagulation-flocculation) กระบวนการแลกเปลี่ยน

ไอออน (ion exchange process) เทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology) นอกจากนี้กระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมีอาจหมายถึงกระบวนการบำบัดในข้อ 1) และ 2) ด้วยก็ได้

- 4) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment process) อาศัยกลไกทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้จุลินทรีย์หรือพืชในการบำบัดน้ำเสีย โดยวัตถุประสงค์หลักมักใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เช่น กระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ (activated sludge) กระบวนการบำบัดไม่ใช้อากาศ และกระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ฯลฯ

นอกจากนี้กระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งประเภทเป็น 3 ประเภทได้ตามขั้นตอนการบำบัด ได้แก่

- 1) การบำบัดขั้นที่ 1 (primary treatment) เป็นการบำบัดเบื้องต้นในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะเน้นการนำของแข็งแขวนลอยและไขมันออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางกายภาพ เช่น ตะแกรง ถังดักกรวดทราย ถังดักไขมัน และถังตกตะกอนชั้นที่หนึ่ง นอกจากนี้ อาจมีการปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมสำหรับการบำบัดในขั้นต่อไป เช่น การปรับพีเอชให้เป็นกลาง การใช้ถังปรับให้เสมอ (equalizing tank) ฯลฯ
- 2) การบำบัดขั้นที่ 2 (secondary treatment) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เช่น กระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์
- 3) การบำบัดขั้นที่ 3 (tertiary treatment) เป็นการบำบัดน้ำเสียในขั้นสูงขึ้นไปเพื่อกำจัดมลพิษอื่น ๆ นอกเหนือจากของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำเสีย เช่น การกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ฯลฯ นอกจากนี้ อาจมีการบำบัดน้ำเพื่อให้คุณภาพที่ดียิ่งขึ้นสำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

การเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดมลพิษนั้น ขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบของน้ำเสียและมลพิษในน้ำเสีย เป้าหมายในการบำบัดน้ำเสียว่าต้องการกำจัดมลพิษใดบ้าง และต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานใดบ้าง นอกจากนี้ การเลือกกระบวนการบำบัดยังขึ้นกับความเหมาะสมทางด้านเทคนิค การเดินระบบ พื้นที่ใช้สอย ต้นทุนการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบอีกด้วย

ทั้งนี้มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรม รวมไปถึงอาคารประเภทต่าง ๆ นั้นมีความแตกต่างกันทั้งในรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่กำหนดและค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำ โดยมาตรฐานเหล่านี้ถือได้ว่าเป็นเป้าหมายที่สำคัญในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด ในที่นี้ขอยกตัวอย่างมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน และมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ในภาคผนวกตามลำดับ สำหรับมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งประเภทอื่น ๆ สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากเว็บไซต์ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลไว้อย่างครบถ้วน

โดยทั่วไปในน้ำเสียจะประกอบไปด้วยมลพิษหลากหลายชนิดและมีองค์ประกอบในน้ำเสียต่าง ๆ มากมาย ระบบบำบัดน้ำเสียจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดเป็นลำดับขั้นตอน เพื่อปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมและกำจัดมลพิษแต่ละกลุ่มได้ตามลำดับ การจัดลำดับของแต่ละกระบวนการบำบัดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากมลพิษหรือองค์ประกอบบางอย่างอาจมีการรบกวนต่อการกำจัดมลพิษตัวอื่นในลำดับขั้นต่อไป จึงจำเป็นต้องมีการเลือกลำดับการบำบัดอย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2-1 แสดงตัวอย่างมลพิษและกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่สามารถกำจัดได้ในทางเทคนิค ซึ่งแบ่งตามกลุ่มของมลพิษ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ การละลายน้ำของมลพิษ

อย่างไรก็ตาม การเลือกกระบวนการบำบัดจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย ซึ่งอาจอยู่นอกเหนือจากความเป็นไปได้ในทางเทคนิค

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างมลพิษและกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดได้ในทางเทคนิค

Inorganic compounds			Organic compounds		
Soluble	Colloidal	Suspended	Soluble	Colloidal	Suspended
Ion exchange	Coagulation/ flocculation/ sedimentation	Sedimentation	Biological treatment		
Chemical precipitation		Filtration	Oxidation	Coagulation/ flocculation/ sedimentation	Sedimentation
Adsorption		Flotation	Advanced oxidation process		Filtration
Air stripping (e.g. ammonia removal)			Adsorption		Flotation
Membrane process			Membrane process		