DỰ ÁN LỒNG GHÉP CHỐNG CHỊU VỚI BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG
ĐỂ PHÁT TRIỂN CÁC ĐÔ THỊ XANH LOẠI II_TA9417-VIE

SẢN PHẨM 3.1

TÀI LIỆU ĐÀO TẠO VÀ NÂNG CAO NĂNG LỰC VỀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG, BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG LIÊN QUAN ĐẾN SỬ DỤNG ĐẤT, ỨNG PHÓ VỚI BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ SẢN XUẤT TIÊU DÙNG BỀN VỮNG

CHỦ ĐỀ 1: BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG NƯỚC
(Tài liệu đọc thêm)

TĂNG CƯỜNG NĂNG LỰC QUẢN LÝ VÀ CHIA SẺ KINH NGHIỆM
VỀ MÔI TRƯỜNG, SỬ DỤNG ĐẤT, THÍCH ỨNG VỚI KHÍ HẬU
CHO CÁN BỘ BỘ TÀI NGUYÊN & MÔI TRƯỜNG
(TA9417-VEA QCBS-05)

ĐƠN VỊ TƯ VẤN
LIÊN DANH GIỮA CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN EPRO VÀ
CÔNG TY CỔ PHẦN TRUYỀN THÔNG BA ĐÌNH

DỰ ÁN LỒNG GHÉP CHỐNG CHỊU VỚI BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG
ĐỂ PHÁT TRIỂN CÁC ĐÔ THỊ XANH LOẠI II (TA9417-VIE)

Sản phẩm 3.1

TÀI LIỆU ĐÀO TẠO VÀ NÂNG CAO NĂNG LỰC VỀ
BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG, BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG LIÊN QUAN ĐẾN SỬ DỤNG ĐẤT,
ỨNG PHÓ VỚI BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ SẢN XUẤT VÀ TIÊU DÙNG BỀN VỮNG

CHỦ ĐỀ 1: BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG NƯỚC
(Tài liệu đọc thêm)

GÓI THẦU
TĂNG CƯỜNG NĂNG LỰC QUẢN LÝ VÀ CHIA SẺ KINH NGHIỆM
VỀ MÔI TRƯỜNG, SỬ DỤNG ĐẤT, THÍCH ỨNG VỚI KHÍ HẬU
CHO CÁN BỘ BỘ TÀI NGUYÊN & MÔI TRƯỜNG
(TA9417-VEA QCBS-05)

ĐƠN VỊ THỰC HIỆN
LIÊN DANH GIỮA CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN EPRO
VÀ CÔNG TY CỔ PHẦN TRUYỀN THÔNG BA ĐÌNH

DUYỆT BỞI
BAN QUẢN LÝ DỰ ÁN LỒNG GHÉP CHỐNG CHỊU VỚI BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ
BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG ĐỂ PHÁT TRIỂN CÁC ĐÔ THỊ XANH LOẠI II

Hà Nội, tháng 10 năm 2025

Lịch sử tài liệu:

Bản số	**Ngày**	**Rà soát/ góp ý bởi**	**Ngày**
Ver.# 1	04/10/2025		

MỤC LỤC

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT 5
DANH MỤC CÁC BẢNG 6
DANH MỤC CÁC HÌNH 7
GIỚI THIỆU 8
Mục đích của tài liệu 8
Đối tượng sử dụng tài liệu 8
Cấu trúc tài liệu 8
1 TỔNG QUAN VỀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG ƯỚC 9
1.1 Ô nhiễm môi trường nước 9
1.1.1 Khái niệm, phân loại, nguồn gốc ô nhiễm 9
1.2 Cơ sở pháp lý và kỹ thuật trong quản lý chất lượng nước 13
1.2.1 Khung pháp lý 13
1.2.2 Các công cụ kỹ thuật trong quản lý chất lượng nước 15
2 PHƯƠNG PHÁP QUAN TRẮC, PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG NƯỚC 18
2.1 Nguyên tắc đánh giá chất lượng nước 18
2.1.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng nước 18
2.1.2 Sự biến đổi của chất lượng nước 18
2.1.3 Mục tiêu đánh giá 18
2.1.4 Đánh giá 19
2.2 Đánh giá chất lượng nước 19
2.2.1 Đánh giá các thông số riêng lẻ trong quản lý chất lượng nước 19
2.2.2 Đánh giá theo chỉ số chất lượng nước WQI (WAater Quality Index) 21
2.3 Phương pháp quan trắc chất lượng nước mặt 28
2.3.1 Một số khái niệm 28
2.3.2 Những lưu ý trong thực hiện quan trắc 30
2.3.3 Quan trắc liên tục, tự động 34
3 KIỂM KÊ, ĐÁNH GIÁ NGUỒN THẢI VÀO MÔI TRƯỜNG NƯỚC 37
3.1 Tổng quan về kiểm kê nguồn thải 37
3.1.1 Giới thiệu chung về kiểm kê nguồn thải 37
3.1.2 Phân loại nguồn thải theo quan điểm kiểm kê 37
3.1.3 Một số khái niệm liên quan đến kiểm kê 38
3.1.4 Vai trò của kiểm kê nguồn thải trong quản lý chất lượng nước 38
3.1.5 Cách tiếp cận trong kiểm kê nguồn ô nhiễm 39
3.2 Các phương pháp kiểm kê nguồn thải 41
3.2.1 Phương pháp nguồn điểm 41
3.2.2 Phương pháp tải lượng sông 41
3.2.3 Phương pháp theo tiếp cận đường đi của chất ô nhiễm (Pathway-oriented) 42
3.2.4 Phương pháp theo tiếp cận nguồn gốc (Source-oriented) 43
3.2.5 So sánh các phương pháp 44
3.3 Quy trình kiểm kê nguồn thải điểm 44
3.3.1 Chuẩn bị kiểm kê 45
3.3.2 Thu thập thông tin và dữ liệu 45
3.3.3 Tính toán tải lượng và xử lý số liệu 46
3.3.4 Quản lý và ứng dụng kết quả kiểm kê 46

3.4 Đánh giá nguồn thải vào môi trường nước 47

4 PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU TẢI CỦA MÔI TRƯỜNG NƯỚC MẶT ĐỂ XÁC ĐỊNH HẠN NGẠCH XẢ THẢI VÀO TỪNG ĐOẠN SÔNG.....48

4.1 Khái niệm, ý nghĩa và nguyên tắc tính toán khả năng chịu tải 48

4.2 Phương pháp tính toán sức chịu tải 48

4.2.1 Các yêu cầu đối với việc tính toán sức chịu tải.....48

4.2.2 Các phương pháp tính toán sức chịu tải.....49

5 NÂNG CAO HIỆU QUẢ XỬ LÝ NƯỚC THẢI SINH HOẠT BẰNG CÔNG NGHỆ TIÊN TIẾN.....57

5.1 Thực trạng hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt Việt Nam hiện nay.....57

5.1.1 Nước thải sinh hoạt – Đặc điểm và tải lượng.....57

5.1.2 Quản lý nước thải đô thị tại Việt Nam 57

5.2 Một số công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt tiên tiến 61

5.2.1 MBR - Membrane Bioreactor 62

5.2.2 AGS - Aerobic Granular Sludge.....63

5.2.3 MBBR - Moving Bed Biofilm Reactor.....64

5.2.4 ANAMMOX - Anaerobic Ammonium Oxidation 65

5.2.5 Thu hồi Struvite 66

5.2.6 AOPs - Advanced Oxidation Processes.....66

5.2.7 Điện hóa (Electrochemical Treatment) 67

5.2.8 NF – Nanofiltration 67

5.2.9 CWs - Constructed Wetlands.....68

5.3 Giải pháp công nghệ thông minh và số hóa trong vận hành hệ thống xử lý nước thải 71

5.4 Xu hướng thu hồi tài nguyên từ xử lý nước thải sinh hoạt.....76

6 DANH SÁCH TÀI LIỆU THAM KHẢO.....81

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

AI	Trí tuệ nhân tạo
BOD	Nhu cầu oxi sinh hóa
BTNMT	Bộ Tài nguyên và môi trường
BVMT	Bảo vệ môi trường
BYT	Bộ Y tế
CAS	Công nghệ bùn hoạt tính truyền thống
COD	Nhu cầu oxi hóa học
DO	Lượng oxi hòa tan
GIS	Hệ thống thông tin địa lý
N	Nitơ
ORP	Thế oxi hóa khử
P	Phốt pho
QCVN	Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia
SBR	Bể phản ứng theo mẻ
TDS	Tổng chất rắn hòa tan
TSS	Tổng chất rắn lơ lửng
WQI	Chỉ số chất lượng nước
XLNT	Xử lý nước thải

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1. Đánh giá chất lượng nước theo WQI 23
Bảng 2. Quy định các giá trị qi, BPi cho các thông số nhóm IV và V 25
Bảng 3. Quy định các giá trị qi, BPi cho các thông số kim loại nặng (nhóm III) 25
Bảng 4. Quy định các giá trị BPi và qi đối với DO% bão hòa 26
Bảng 5. Quy định các giá trị BPi và qi đối với thông số pH 26
Bảng 6. Quy định trọng số của các nhóm thông số 28
Bảng 7. So sánh các phương pháp kiểm kê nguồn thải 44
Bảng 8. Tổng công suất thiết kế và số lượng nhà máy xử lý nước thải đang hoạt động tại Việt Nam được phân loại theo phương pháp xử lý 59
Bảng 9. Một số công nghệ xử lý nước thải tiên tiến.....69
Bảng 10. So sánh hiệu quả chi phí, hiệu suất xử lý và tính bền vững của các công nghệ xử lý nước thải tiên tiến 70
Bảng 11. Ứng dụng tiềm năng của các công nghệ thông minh phổ biến và công nghệ dẫn dắt xu thế trong xử lý nước thải 75

DANH MỤC CÁC HÌNH

Hình 1. Nhà máy xử lý nước thải Bakdal, Hàn Quốc.....76
Hình 2. Nhà máy xử lý nước thải Blue Plains, Mỹ 78
Hình 3. Nhà máy xử lý nước thải Strass, Áo.....79

GIỚI THIỆU

Mục đích của tài liệu

Tài liệu được biên soạn nhằm cung cấp kiến thức cơ bản, hệ thống để nâng cao năng lực cho cán bộ ngành môi trường trong công tác bảo vệ môi trường nước. Nội dung tập trung vào các vấn đề trọng tâm như: đánh giá chất lượng nước, kiểm kê nguồn thải, tính toán sức chịu tải của nguồn nước và giới thiệu các công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt tiên tiến.

Đối tượng sử dụng tài liệu

Tài liệu dành cho cán bộ quản lý, các tổ chức và cá nhân quan tâm, làm việc trong lĩnh vực quản lý và bảo vệ môi trường nước.

Cấu trúc tài liệu

Tài liệu gồm có 6 phần gồm:

1. Tổng quan về quản lý chất lượng nước: Khái niệm, phân loại, nguồn gốc ô nhiễm; Cơ sở pháp lý kỹ thuật trong quản lý chất lượng nước.
2. Đánh giá chất lượng nước: Nguyên tắc, phương pháp đánh giá chất lượng nước.
3. Kiểm kê nguồn thải: Tổng quan, phương pháp và quy trình kiểm kê nguồn thải.
4. Sức chịu tải của nguồn nước: Khái niệm, ý nghĩa, phương pháp tính toán sức chịu tải.
5. Nâng cao hiệu quả xử lý nước thải sinh hoạt bằng công nghệ tiên tiến: Thực trạng hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt của Việt Nam và một số công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt tiên tiến.
6. Danh mục tài liệu tham khảo: Giúp học viên nghiên cứu chuyên sâu hơn về các chủ đề liên quan.

1 TỔNG QUAN VỀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG ƯỚC

1.1 Ô nhiễm môi trường nước

1.1.1 Khái niệm, phân loại, nguồn gốc ô nhiễm

a. Định nghĩa ô nhiễm môi trường

Theo Tổ chức Y tế Thế giới: *"Sự ô nhiễm là việc chuyển các chất thải hoặc năng lượng vào môi trường đến mức có khả năng gây tác hại đến sức khoẻ con người, đến sự phát triển sinh vật hoặc làm suy giảm chất lượng môi trường."*

Theo luật BVMT *"Ô nhiễm môi trường là sự biến đổi của các thành phần môi trường không phù hợp với tiêu chuẩn môi trường, gây ảnh hưởng xấu đến con người, sinh vật."*

b. Các loại hình ô nhiễm môi trường nước

Ô nhiễm môi trường nước có thể được phân loại thành nhiều loại hình khác nhau, mỗi loại đều có những tác động tiêu cực riêng biệt đến hệ sinh thái và sức khỏe con người. Dưới đây là các loại hình ô nhiễm môi trường nước phổ biến nhất:

Thiếu ôxy: Xảy ra khi các chất hữu cơ trong nước bị vi sinh vật phân hủy, tiêu thụ một lượng lớn oxy hòa tan (DO). Khi nồng độ DO giảm xuống quá thấp, các loài thủy sinh không thể hô hấp và chết, làm suy thoái nghiêm trọng hệ sinh thái dưới nước.

Dư thừa chất dinh dưỡng: Chủ yếu do sự xuất hiện quá nhiều nitơ và phốt pho từ phân bón nông nghiệp hoặc chất thải. Các chất này thúc đẩy sự phát triển bùng nổ của tảo và thực vật thủy sinh, gây ra hiện tượng phú dưỡng. Tảo nở hoa làm giảm ánh sáng mặt trời, cản trở quang hợp của các loài khác và khi chết đi sẽ làm tăng nhu cầu oxy hòa tan trong nước, dẫn đến thiếu ôxy.

Ô nhiễm chất độc: Các chất độc hại như kim loại nặng (chì, thủy ngân, cadmium), hóa chất bảo vệ thực vật, thuốc trừ sâu, và các hợp chất hữu cơ khó phân hủy (như PCB) xâm nhập vào nguồn nước. Các chất này có thể tích lũy sinh học trong chuỗi thức ăn, gây ngộ độc và các bệnh lý nghiêm trọng cho động vật và con người.

Ô nhiễm nhiệt: Xảy ra khi nước ấm từ các nhà máy điện hoặc khu công nghiệp được xả ra sông, hồ. Nước ấm làm giảm lượng oxy hòa tan và thay đổi điều kiện môi trường sống, gây stress cho các loài thủy sinh không chịu được nhiệt độ cao, dẫn đến sự suy giảm đa dạng sinh học.

Ô nhiễm phóng xạ: Đây là loại ô nhiễm nguy hiểm do các chất thải phóng xạ từ các nhà máy điện hạt nhân, cơ sở nghiên cứu hoặc khai thác khoáng sản rò rỉ vào nguồn nước. Các chất phóng xạ có thể gây đột biến gen và ung thư cho các sinh vật tiếp xúc, và tác động lâu dài đến môi trường.

c. Các nguồn ô nhiễm nước

Nguồn ô nhiễm môi trường nước có thể được phân loại dựa trên bản chất phát sinh hoặc đặc điểm quản lý.

Phân loại theo bản chất:

- **Do hoạt động tự nhiên hoặc thiên tai:** Bao gồm các hiện tượng như lũ lụt cuốn theo chất thải, xói mòn đất, núi lửa phun trào hay sự phân hủy tự nhiên của xác thực vật và động vật trong môi trường nước. Các hiện tượng này làm thay đổi thành phần và tính chất của nước.
- **Do hoạt động của con người:** Đây là nguồn ô nhiễm chủ yếu và phổ biến nhất, chủ yếu đến từ việc xả nước thải. Các loại nước thải này bao gồm:
    - ***Nước thải sinh hoạt (Domestic wastewater):*** Phát sinh từ các hoạt động hàng ngày của con người như tắm giặt, nấu ăn, và vệ sinh. Nước thải này thường chứa các chất rắn lơ lửng (SS), chất hữu cơ dễ phân hủy sinh học, các chất dinh dưỡng như Nitơ (N), Phốt pho (P) và các vi sinh vật gây bệnh. Lưu lượng và thành phần của nước thải sinh hoạt phụ thuộc vào nhiều yếu tố như mức sống, lối sống, khí hậu và phương thức thu gom.
    - ***Nước thải đô thị (Municipal wastewater):*** Là sự kết hợp của nước thải sinh hoạt, nước thải vệ sinh và nước thải từ các hoạt động công nghiệp nhỏ trong khu vực đô thị. Nước thải này được thu gom vào hệ thống cống chung của đô thị.
    - ***Nước thải công nghiệp (Industrial wastewater):*** Được tạo ra từ các quy trình sản xuất của các ngành công nghiệp. Thành phần và mức độ ô nhiễm của loại nước thải này rất đa dạng, tùy thuộc vào ngành sản xuất cụ thể (ví dụ: ngành dệt nhuộm có hàm lượng hóa chất cao, ngành chế biến thực phẩm có hàm lượng chất hữu cơ cao).
    - ***Nước thải nông nghiệp (Agricultural wastewater):*** Chủ yếu là nước chảy tràn từ các cánh đồng. Nước thải này chứa dư lượng phân bón, thuốc trừ sâu, và các hóa chất bảo vệ thực vật, gây ô nhiễm các nguồn nước mặt và nước ngầm.

Phân loại theo đặc điểm quản lý nguồn thải:

- **Nguồn điểm (point source):** Là các nguồn gây ô nhiễm có vị trí xả thải cụ thể, cố định và có thể xác định được lưu lượng cũng như nồng độ các chất ô nhiễm. Việc quản lý và kiểm soát các nguồn này tương đối dễ dàng hơn.
    - ***Ví dụ:*** Nước thải từ một nhà máy công nghiệp được xả ra sông qua một đường ống duy nhất, hoặc nước thải từ một khu dân cư được thu gom và xử lý tập trung.

- **Nguồn diện/không điểm (non-point source):** Là các nguồn gây ô nhiễm phân tán, không có vị trí cố định và khó xác định được lưu lượng hay nồng độ chính xác của chất ô nhiễm. Việc kiểm soát các nguồn này phức tạp hơn nhiều.
    - ***Ví dụ:*** Nước mưa chảy tràn qua các khu vực đô thị, các cánh đồng nông nghiệp và các bãi rác, mang theo bụi bẩn, hóa chất và chất thải vào nguồn nước.

d. Các tác nhân gây ô nhiễm

Ô nhiễm môi trường nước được gây ra bởi nhiều tác nhân khác nhau, mỗi loại có những đặc điểm và tác động riêng biệt đến hệ sinh thái và chất lượng nước.

- **Các chất rắn lơ lửng và trầm tích:** Các chất rắn lơ lửng (Suspended Solids - SS) và trầm tích bao gồm các hạt vật chất không hòa tan trong nước. Khi có hàm lượng cao, chúng làm tăng độ đục của nước, cản trở sự quang hợp của thực vật thủy sinh và có thể gây tắc nghẽn các hệ thống thủy lợi. Ngoài ra, chúng còn là môi trường để các chất ô nhiễm khác như kim loại nặng, thuốc bảo vệ thực vật bám vào và di chuyển trong thủy vực, gây ô nhiễm thứ cấp.
- **Các chất tiêu thụ oxy:** Các chất này khi vào nguồn nước sẽ tiêu thụ oxy hòa tan (DO), một yếu tố thiết yếu cho sự sống của các sinh vật thủy sinh. Hàm lượng DO lý tưởng trong nước sạch thường từ 7,5 đến 10 mg/l. Khi lượng chất tiêu thụ oxy tăng, nồng độ DO giảm, gây ra hiện tượng thiếu hụt oxy làm ảnh hưởng nghiêm trọng đến sự phát triển, thậm chí gây chết hàng loạt các loài thủy sinh. Các chất tiêu thụ oxy chủ yếu là các chất hữu cơ từ nước thải.
    - ***Nhu cầu oxy sinh hóa (BOD_5 - Biochemical Oxygen Demand):*** Lượng oxy cần thiết để vi sinh vật phân hủy chất hữu cơ trong 5 ngày.
    - ***Nhu cầu oxy hóa học (COD - Chemical Oxygen Demand):*** Lượng oxy cần để oxy hóa hoàn toàn các chất hữu cơ bằng các chất oxy hóa mạnh.
- **Các chất dinh dưỡng:** Các hợp chất chứa Nitơ (N) và Phốt pho (P) là những chất dinh dưỡng cần thiết cho sự phát triển của thực vật. Tuy nhiên, khi nồng độ của chúng vượt quá mức cho phép, chúng sẽ kích thích sự phát triển bùng nổ của rong, tảo, gây ra hiện tượng phú dưỡng (Eutrophication). Hiện tượng này dẫn đến "tảo nở hoa" làm suy giảm ánh sáng mặt trời, cản trở quang hợp của các loài khác. Khi rong, tảo chết đi, quá trình phân hủy sẽ tiêu thụ một lượng lớn oxy hòa tan, gây ra tình trạng thiếu oxy nghiêm trọng cho thủy sinh vật.
- **Sinh vật gây bệnh:** Nước là môi trường lý tưởng để lây lan các mầm bệnh. Các vi sinh vật gây bệnh như vi khuẩn (tả, thương hàn), virus (viêm gan) và động vật nguyên sinh (lỵ) có thể xâm nhập vào nguồn nước qua nước thải sinh hoạt và động vật. Các bệnh liên quan đến nước có thể lây truyền qua đường tiêu hóa do uống nước bị nhiễm bẩn, hoặc lây truyền qua tiếp xúc da với nước nhiễm bẩn.

- **Muối vô cơ hòa tan:** Sự hiện diện của các muối vô cơ hòa tan được biểu thị bằng Tổng chất rắn hòa tan (TDS - Total Dissolved Solids). Nồng độ TDS cao có thể ảnh hưởng đến chất lượng nước, đặc biệt là trong nông nghiệp, nơi nước tưới bị bốc hơi làm tăng độ mặn của đất, gây ảnh hưởng xấu đến cây trồng.
- **Kim loại nặng:** Kim loại nặng là các kim loại có tỷ trọng lớn (thường > 4-5 g/cm³), có độc tính cao đối với con người và sinh vật. Các kim loại như Asen (As), Thủy ngân (Hg), Cadimi (Cd), Chì (Pb) có thể tồn tại trong nước dưới dạng muối hòa tan hoặc phức chất. Chúng dễ dàng đi vào cơ thể con người một cách trực tiếp hoặc gián tiếp thông qua chuỗi thức ăn, gây ra các bệnh lý nghiêm trọng.
- **Hợp chất hữu cơ và hóa chất bảo vệ thực vật:** Đây là một nhóm tác nhân ô nhiễm đa dạng, bao gồm hơn 10.000 loại hóa chất khác nhau như thuốc trừ sâu, thuốc diệt cỏ, thuốc diệt nấm... Chúng có độc tính cao và có khả năng tồn tại lâu dài trong môi trường.
- **Ô nhiễm nhiệt:** Ô nhiễm nhiệt xảy ra khi các nguồn nước nóng, chủ yếu từ các nhà máy điện hoặc cơ sở công nghiệp, được xả thẳng ra các thủy vực tự nhiên. Nhiệt độ nước tăng cao làm giảm khả năng hòa tan của oxy và gây stress nhiệt cho các loài thủy sinh, dẫn đến suy giảm đa dạng sinh học và phá vỡ cân bằng hệ sinh thái.

e. Các dạng nguồn tiếp nhận nước thải

Nguồn tiếp nhận là nơi tiếp nhận và xử lý nước thải từ các hoạt động của con người hoặc tự nhiên. Các nguồn tiếp nhận chính có thể được phân loại thành hai dạng cơ bản:

- **Các nguồn nước mặt:** Bao gồm sông, suối, kênh, mương, ao, hồ, và các vùng chứa nước. Đây là dạng nguồn tiếp nhận phổ biến nhất, nơi nước thải được pha loãng và xử lý một phần thông qua các quá trình tự nhiên.
- **Các nguồn nước dưới đất:** Nước ngầm cũng có thể trở thành nguồn tiếp nhận khi nước thải thấm qua đất. Tuy nhiên, khả năng tự làm sạch của nước ngầm rất hạn chế, do đó, việc ô nhiễm nước ngầm thường gây hậu quả nghiêm trọng và khó khắc phục.

Vấn đề pha loãng, phân tán và biến đổi các chất ô nhiễm

Khi chất ô nhiễm xâm nhập vào nguồn tiếp nhận, chúng trải qua một loạt các quá trình vật lý, hóa học và sinh học. Sự hiểu biết về các quá trình này là nền tảng cho việc mô hình hóa chất lượng nước, bao gồm cả các bài toán phức tạp về độc tố, phú dưỡng và sinh thái.

- **Nguồn thải:** Đặc điểm của nguồn thải là yếu tố đầu tiên ảnh hưởng đến sự biến đổi của chất ô nhiễm trong nguồn tiếp nhận.

- Loại nguồn thải: Nước thải có thể từ nguồn điểm (như ống xả của nhà máy) hoặc nguồn diện/không điểm (như nước mưa chảy tràn).
- Đặc trưng ô nhiễm: Bao gồm loại chất ô nhiễm (hữu cơ, vô cơ, kim loại nặng, vi sinh vật), nồng độ và lưu lượng của chúng.
- Cách thức thải: Liên tục hay gián đoạn.

- **Nguồn tiếp nhận:** Các đặc điểm thủy văn và vật lý của nguồn tiếp nhận quyết định khả năng tự làm sạch.
  - Sông, suối: Là nguồn nước động, có dòng chảy. Dòng chảy mạnh giúp pha loãng và phân tán chất ô nhiễm nhanh chóng, giảm nồng độ. Sông, suối có khả năng tự phục hồi chất lượng nước khi tiếp nhận các chất ô nhiễm có khả năng phân hủy sinh học và trong giới hạn cho phép.
  - Ao, hồ, vùng chứa: Là nguồn nước tĩnh, không có dòng chảy rõ rệt. Khả năng pha loãng và phân tán kém hiệu quả. Thường xảy ra hiện tượng phân tầng ô nhiễm, nơi các lớp nước khác nhau có nồng độ ô nhiễm khác nhau. Ao, hồ dễ bị quá tải ô nhiễm.

- **Quá trình biến đổi của chất ô nhiễm:**
  - Pha loãng và phân tán: Chất ô nhiễm hòa trộn với nước nguồn tiếp nhận, làm giảm nồng độ. Dòng chảy mạnh và sự xáo trộn của nước giúp quá trình này diễn ra hiệu quả hơn.
  - Lắng đọng: Các chất ô nhiễm dạng hạt (như chất rắn lơ lửng) lắng xuống đáy, tạo thành lớp trầm tích.
  - Biến đổi hóa học: Các phản ứng hóa học như oxy hóa, khử, hoặc kết tủa có thể làm thay đổi tính chất và độc tính của chất ô nhiễm.
  - Biến đổi sinh học: Vi sinh vật trong nước phân hủy các chất hữu cơ, làm giảm nồng độ của chúng. Quá trình này cần oxy và là nguyên nhân gây ra hiện tượng "đường cong suy giảm oxy" (oxygen sag curve), nơi nồng độ DO giảm đáng kể sau điểm xả thải. Sự suy giảm DO này ảnh hưởng trực tiếp đến các loài thủy sinh cần hàm lượng oxy cao.

1.2 Cơ sở pháp lý và kỹ thuật trong quản lý chất lượng nước

1.2.1 Khung pháp lý

Khung pháp lý về quản lý môi trường nước tại Việt Nam được xây dựng trên một hệ thống văn bản pháp luật chặt chẽ, từ luật nền tảng đến các văn bản dưới luật và quy chuẩn kỹ thuật.

a. Luật nền tảng

Các luật này quy định các nguyên tắc, chính sách cơ bản nhất trong việc quản lý, khai thác, bảo vệ và sử dụng tài nguyên nước.

- Luật Tài nguyên nước 2023: Tập trung vào việc quản lý tổng hợp tài nguyên nước, bao gồm bảo vệ, điều hòa, phân phối, phục hồi và phát triển nguồn nước, cũng như phòng, chống và khắc phục các tác hại do nước gây ra.
- Luật Bảo vệ môi trường 2020: Đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát ô nhiễm nước, thiết lập các quy định về cấp phép xả thải và quy chuẩn quan trắc môi trường nước.
- Luật Thủy lợi 2017: Quản lý các công trình thủy lợi, điều tiết nguồn nước phục vụ sản xuất và sinh hoạt.

b. Nghị định và Thông tư hướng dẫn

Đây là các văn bản dưới luật, quy định chi tiết và hướng dẫn việc thực thi các luật đã ban hành.

- Nghị định 08/2022/NĐ-CP: Quy định chi tiết một số điều của Luật Bảo vệ môi trường, bao gồm các nội dung cụ thể về quản lý nước thải, quan trắc môi trường tự động, liên tục.
- Thông tư 05/2025/TT-BTNMT: Cung cấp các hướng dẫn kỹ thuật chi tiết về quản lý nước thải sinh hoạt và nước thải đô thị.
- Thông tư 52/2024/TT-BYT: Quy định các nội dung kiểm tra, giám sát chất lượng nước sạch sinh hoạt, thay thế Thông tư 41/2018/TT-BYT và có hiệu lực từ ngày 01/7/2025.

c. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia (QCVN)

Quy chuẩn kỹ thuật là các văn bản quy định các giới hạn tối đa cho phép của các thông số ô nhiễm trong nước.

- QCVN 08-MT:2023/BTNMT: Quy định về chất lượng nước mặt, áp dụng cho các sông, hồ, kênh, rạch, làm cơ sở để đánh giá mức độ ô nhiễm và mục đích sử dụng.
- QCVN 14:2025/BTNMT: Quy định về nước thải sinh hoạt và đô thị trước khi xả ra môi trường.
- QCVN 40:2011/BTNMT: Quy định về nước thải công nghiệp, áp dụng cho các cơ sở sản xuất.
- QCVN 09:2015/BTNMT: Quy định về chất lượng nước ngầm, phục vụ mục đích khai thác và sử dụng.

- QCVN 01-1:2018/BYT (đang được thay thế) và QCVN mới theo Thông tư 52/2024/TT-BYT: Quy định về chất lượng nước sạch dùng cho sinh hoạt, đảm bảo an toàn cho sức khỏe cộng đồng.

d. Cơ quan quản lý và thực thi

Việc quản lý chất lượng nước được thực hiện bởi một hệ thống các cơ quan từ cấp trung ương đến địa phương, với sự phân công trách nhiệm rõ ràng:

- Bộ Nông nghiệp và Môi trường: Cơ quan quản lý nhà nước cấp trung ương về lĩnh vực này.
- Cục Quản lý tài nguyên nước: Chịu trách nhiệm quản lý, khai thác, sử dụng và bảo vệ các nguồn nước.
- Bộ Y tế - Cục Quản lý môi trường y tế: Giám sát và kiểm soát chất lượng nước sạch dùng cho sinh hoạt, đảm bảo an toàn vệ sinh.
- Sở Nông nghiệp và Môi trường các tỉnh/thành: Thực hiện chức năng quản lý nhà nước về tài nguyên nước và môi trường tại địa phương, cấp phép, kiểm tra và xử lý vi phạm.

1.2.2 Các công cụ kỹ thuật trong quản lý chất lượng nước

Quản lý chất lượng nước là một quá trình phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp của nhiều công cụ kỹ thuật từ việc thu thập dữ liệu, phân tích, đến lập kế hoạch và ra quyết định. Dưới đây là các công cụ kỹ thuật chính được sử dụng.

a. Hệ thống quan trắc và điều tra cơ bản về chất lượng nước

- **Mục tiêu:**
  - Theo dõi diễn biến chất lượng nước theo thời gian và không gian một cách có hệ thống.
  - Cung cấp dữ liệu tin cậy để phục vụ các mục đích như quy hoạch, cảnh báo ô nhiễm và hỗ trợ ra quyết định.
- **Các loại hình quan trắc:**
  - Quan trắc định kỳ: Thực hiện tại các điểm lấy mẫu cố định theo một chu kỳ nhất định (ví dụ: hàng quý, hàng năm).
  - Quan trắc tự động, liên tục: Được lắp đặt tại các điểm xả thải lớn, các hồ chứa quan trọng hoặc các đoạn sông chính. Hệ thống này cung cấp dữ liệu theo thời gian thực, giúp cảnh báo sớm các sự cố môi trường.
  - Quan trắc chuyên đề: Thực hiện khi có sự cố ô nhiễm hoặc để điều tra chi tiết một vấn đề cụ thể, như đánh giá tác động của một nguồn thải mới.

- **Công cụ và hệ thống:** Các hệ thống thông minh (IoT) và phần mềm quản lý dữ liệu (như Envisoft, WISENet, QGIS) được sử dụng để tự động hóa và lưu trữ dữ liệu.

b. Kiểm kê nguồn thải

- **Mục tiêu:** Xác định một cách đầy đủ và chính xác tất cả các nguồn gây ô nhiễm nước trong một khu vực, bao gồm nguồn điểm (công nghiệp, sinh hoạt tập trung) và nguồn không điểm (nông nghiệp, đô thị).
- **Quy trình kiểm kê:**
  - Thu thập thông tin chi tiết về các cơ sở xả thải (loại hình sản xuất, công suất).
  - Đo đạc lưu lượng và tải lượng ô nhiễm (nồng độ và khối lượng chất ô nhiễm thải ra) từ các nguồn này.
  - Tổng hợp và lập báo cáo kiểm kê để có cái nhìn toàn diện về bức tranh ô nhiễm.
- **Công cụ:** Sử dụng các biểu mẫu kiểm kê và hệ thống cơ sở dữ liệu để quản lý thông tin nguồn thải.

c. Đánh giá chất lượng nước

- **Mục tiêu:** Xác định hiện trạng chất lượng nước và so sánh với các tiêu chuẩn đã được quy định.
- **Các chỉ tiêu đánh giá:** Bao gồm các chỉ tiêu vật lý (độ đục, màu, nhiệt độ), hóa học (pH, BOD, COD, kim loại nặng) và sinh học (Coliform, E. coli).
- **Phương pháp đánh giá:**
  - Đánh giá theo chỉ tiêu đơn lẻ: So sánh trực tiếp nồng độ của từng chỉ tiêu với giá trị giới hạn trong các Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia (QCVN).
  - Đánh giá theo chỉ số chất lượng nước (WQI - Water Quality Index): Đây là một chỉ số tổng hợp, được tính toán từ nhiều thông số khác nhau, cung cấp một con số duy nhất phản ánh chất lượng nước một cách tổng thể.

d. Mô hình hóa và dự báo chất lượng nước

- **Mục tiêu:**
  - Dự báo diễn biến chất lượng nước trong tương lai dựa trên các kịch bản phát triển hoặc các sự cố giả định.
  - Hỗ trợ lập kế hoạch, quy hoạch và đưa ra các cảnh báo sớm.
- **Các mô hình phổ biến:** Các phần mềm mô hình như MIKE 11/21 (mô phỏng thủy văn và chất lượng nước sông, hồ), SWAT (mô hình hóa tác động của việc sử

dụng đất trên lưu vực) và WEAP (phân tích kịch bản phân bổ nước) được sử dụng rộng rãi.

- **Ứng dụng:** Mô hình hóa giúp dự đoán ảnh hưởng của sự cố tràn dầu, xây dựng kịch bản phát triển đô thị, công nghiệp, và tính toán khả năng chịu tải của các thủy vực.

e. Đánh giá khả năng chịu tải của nguồn nước

- **Mục tiêu:** Xác định tải lượng chất ô nhiễm tối đa mà một nguồn nước có thể tiếp nhận mà không vượt quá các quy chuẩn chất lượng cho phép.
- **Quy trình đánh giá:**
  - Tính toán tải lượng ô nhiễm hiện tại từ tất cả các nguồn thải.
  - Sử dụng mô hình hóa để mô phỏng và dự báo khả năng tự làm sạch của nguồn nước.
  - So sánh với ngưỡng chịu tải tối đa đã được quy định.
- **Ứng dụng:** Kết quả đánh giá là cơ sở khoa học để cấp phép xả thải, quy hoạch phát triển bền vững và giám sát ô nhiễm theo vùng.

f. Quy hoạch và phân bổ nước

- **Mục tiêu:** Đảm bảo việc sử dụng tài nguyên nước một cách hiệu quả, công bằng và bền vững cho các mục đích khác nhau (sinh hoạt, công nghiệp, nông nghiệp).
- **Quy trình:**
  - Điều tra, đánh giá hiện trạng tài nguyên nước.
  - Dự báo nhu cầu sử dụng nước trong tương lai.
  - Xây dựng các kịch bản phát triển.
  - Phân bổ nước theo thứ tự ưu tiên và khả năng nguồn.

2 PHƯƠNG PHÁP QUAN TRẮC, PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG NƯỚC

2.1 Nguyên tắc đánh giá chất lượng nước

Đánh giá chất lượng nước là một quá trình khoa học, hệ thống nhằm xác định mức độ phù hợp của nước với các mục đích sử dụng khác nhau như sinh hoạt, nông nghiệp, công nghiệp, và bảo tồn hệ sinh thái. Quá trình này bao gồm việc thu thập, phân tích và diễn giải dữ liệu để đưa ra các kết luận chính xác về tình trạng nguồn nước.

2.1.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng nước

Chất lượng nước là một trạng thái luôn biến đổi do chịu tác động của nhiều yếu tố từ tự nhiên và con người:

- **Các yếu tố tự nhiên:** Bao gồm đặc điểm địa chất của khu vực (làm thay đổi độ cứng, pH của nước), khí hậu (mưa, nhiệt độ, tốc độ bay hơi) và các đặc điểm thủy văn (lưu lượng dòng chảy, tốc độ xả lũ).
- **Các yếu tố nhân tạo:** Chủ yếu đến từ các hoạt động của con người, bao gồm nước thải sinh hoạt, công nghiệp, nông nghiệp và các hoạt động khai thác, xây dựng. Các hoạt động này đưa vào nguồn nước các chất ô nhiễm như hóa chất, kim loại nặng, chất dinh dưỡng, vi sinh vật gây bệnh, v.v.

2.1.2 Sự biến đổi của chất lượng nước

Chất lượng nước không cố định mà thay đổi liên tục theo không gian và thời gian, phản ánh sự phức tạp của các quá trình tự nhiên và nhân tạo.

- **Theo không gian:** Chất lượng nước có thể thay đổi đáng kể dọc theo chiều dài của một con sông hoặc theo chiều sâu của một hồ. Ví dụ, một con sông có thể sạch ở thượng nguồn nhưng bị ô nhiễm nặng khi chảy qua khu dân cư hoặc khu công nghiệp.
- **Theo thời gian:** Sự thay đổi diễn ra theo nhiều chu kỳ: theo giờ (do hoạt động sản xuất), theo mùa (mùa khô nồng độ ô nhiễm cao hơn do thiếu nước pha loãng, mùa mưa tải lượng ô nhiễm tăng do nước chảy tràn) và theo năm (phản ánh xu hướng phát triển kinh tế-xã hội của khu vực).

2.1.3 Mục tiêu đánh giá

Tùy thuộc vào mục đích sử dụng, việc đánh giá chất lượng nước có thể được thực hiện với các mục tiêu cụ thể:

- **Đơn mục tiêu:** Tập trung giải quyết một vấn đề riêng biệt, ví dụ như đánh giá mức độ phú dưỡng của một hồ nước hoặc xác định nồng độ kim loại nặng trong nguồn nước ngầm.

- **Đa mục tiêu:** Đánh giá chất lượng nước để phục vụ nhiều nhu cầu khác nhau, chẳng hạn như kiểm tra nước có đủ điều kiện để làm nước cấp sinh hoạt, nuôi trồng thủy sản hay sản xuất công nghiệp không.

2.1.4 Đánh giá

Sau khi thu thập và phân tích dữ liệu, bước quan trọng tiếp theo là đánh giá.

- **Xác định tình trạng nước:** Dựa trên các chỉ số thu được, so sánh với các quy chuẩn kỹ thuật (ví dụ: QCVN 08) để phân loại nguồn nước thuộc loại tốt, trung bình hay ô nhiễm.
- **Phân tích nguyên nhân ô nhiễm:** Xác định các nguồn thải và tác nhân chính gây ra ô nhiễm, từ đó đưa ra các giải pháp kiểm soát hiệu quả.
- **Đánh giá xu hướng dài hạn:** Phân tích dữ liệu trong một khoảng thời gian dài để nhận diện xu hướng biến đổi của chất lượng nước, từ đó dự báo các vấn đề tiềm ẩn và xây dựng các chiến lược quản lý bền vững.

2.2 Đánh giá chất lượng nước

2.2.1 Đánh giá các thông số riêng lẻ trong quản lý chất lượng nước

Đánh giá chất lượng nước bằng các thông số riêng lẻ là một phương pháp trực tiếp và cơ bản, được áp dụng rộng rãi để xác định mức độ phù hợp của nguồn nước với các mục đích sử dụng cụ thể.

a. Cơ sở phương pháp và nguyên tắc

Phương pháp này dựa trên nguyên tắc so sánh trực tiếp giá trị đo được của từng thông số chất lượng nước (như pH, DO, COD, v.v.) với giá trị giới hạn cho phép được quy định trong các Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia (QCVN) hiện hành. Nếu chỉ cần một thông số vượt quá ngưỡng quy định, nguồn nước sẽ được kết luận là không đạt chuẩn cho mục đích sử dụng đó, bất kể các thông số còn lại có đạt yêu cầu hay không. Cách tiếp cận này được coi là "nguyên tắc cứng rắn" (strict principle) nhằm đảm bảo mức độ an toàn cao nhất.

b. Các Quy chuẩn thường dùng tại Việt Nam

Việt Nam có một hệ thống các QCVN được ban hành bởi Bộ Tài nguyên và Môi trường (BTNMT) và Bộ Y tế (BYT) để làm cơ sở pháp lý cho việc đánh giá:

- QCVN 08-MT:2015/BTNMT: Chất lượng nước mặt dùng cho sông, hồ, kênh, rạch.
- QCVN 09-MT:2015/BTNMT: Chất lượng nước dưới đất.
- QCVN 01-1:2018/BYT: Chất lượng nước uống.
- QCVN 02:2009/BYT: Chất lượng nước sinh hoạt.

c. Các chỉ số đơn lẻ phổ biến dùng trong đánh giá

- **Chỉ số vật lý:**
  - pH: Phản ánh tính axit hoặc kiềm của nước. Hầu hết các sinh vật thủy sinh chỉ có thể tồn tại trong giới hạn pH nhất định, thường từ 6,5 đến 8,5.
  - Độ đục: Liên quan đến hàm lượng các chất rắn lơ lửng, ảnh hưởng đến khả năng quang hợp của thực vật thủy sinh và tính thẩm mỹ của nước.
- **Chỉ số hóa học:**
  - DO: Nồng độ DO dưới 4 mg/L thường là dấu hiệu của ô nhiễm hữu cơ nặng.
  - BOD_5: Phản ánh mức độ ô nhiễm hữu cơ.
  - COD: Phản ánh tổng mức độ ô nhiễm chất hữu cơ khó phân hủy.
  - Amoni (NH_4^+), Nitrat (NO_3^-), Phốt phát (PO_4^{3-}): Phản ánh ô nhiễm do các chất dinh dưỡng.
  - Kim loại nặng: Các kim loại như Asen (As), Chì (Pb), Cadimi (Cd), Thủy ngân (Hg), v.v., có độc tính cao ngay cả ở nồng độ rất thấp và có khả năng tích lũy sinh học.
- **Chỉ số vi sinh:** Tổng số Coliform và E. coli: Là các chỉ số chính để đánh giá mức độ ô nhiễm phân, cho thấy nước có nguy cơ chứa các vi sinh vật gây bệnh như vi khuẩn tả, lỵ.

d. Cách đánh giá

- **So sánh trực tiếp từng chỉ số**

Phương pháp này xem xét từng thông số chất lượng nước một cách độc lập. Giá trị đo được tại hiện trường hoặc trong phòng thí nghiệm (Ci) được đối chiếu trực tiếp với giá trị giới hạn tối đa cho phép (Si) được quy định trong các Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia (QCVN).

Ví dụ minh họa: Theo QCVN 08-MT:2015/BTNMT, giá trị oxy hòa tan (DO) tối thiểu cho mục đích tưới tiêu (Cột B1) là 4 mg/L. Nếu kết quả đo chỉ số DO tại một điểm là 3,5 mg/L, thì giá trị này không đạt chuẩn, và nguồn nước sẽ được kết luận là không phù hợp cho mục đích tưới tiêu, bất kể các chỉ số khác có tốt đến đâu.

- **Tính tỷ lệ vượt chuẩn**

Để định lượng mức độ ô nhiễm, chúng ta có thể tính tỷ lệ vượt chuẩn (**Pi**) của mỗi thông số theo công thức:

$$Pi = Ci/ Si$$

Trong đó:

- **Ci**: Nồng độ thực tế đo được của thông số i.
- **Si**: Giá trị giới hạn tối đa cho phép của thông số i theo quy chuẩn.

Nếu **Pi>1**, điều đó có nghĩa là nồng độ của thông số i đã vượt quá giới hạn cho phép. Tỷ lệ này càng lớn, mức độ ô nhiễm càng nghiêm trọng.

- **Kết luận tổng thể**

Khi đánh giá nhiều thông số cùng lúc, nguyên tắc phổ biến là lấy thông số có mức độ ô nhiễm cao nhất (hay giá trị Pi lớn nhất) để xác định tình trạng tổng thể của nguồn nước. Cách tiếp cận "cứng rắn" này đảm bảo an toàn vì nó tập trung vào chỉ tiêu xấu nhất, giúp nhận diện và giải quyết các vấn đề ô nhiễm nghiêm trọng nhất trước tiên.

e. Ưu và nhược điểm của phương pháp

- **Ưu điểm:** Phương pháp này rất đơn giản và dễ áp dụng, phù hợp cho việc kiểm tra nhanh và đánh giá ban đầu.
- **Nhược điểm:**
  - Phương pháp này không cung cấp một bức tranh toàn diện về chất lượng nước vì nó đánh giá từng thông số một cách riêng lẻ.
  - Chỉ một thông số vượt chuẩn cũng có thể dẫn đến kết luận toàn bộ nguồn nước không đạt yêu cầu, trong khi các thông số khác có thể vẫn trong giới hạn cho phép.

2.2.2 Đánh giá theo chỉ số chất lượng nước WQI (WAater Quality Index)

Chỉ số chất lượng nước WQI là một công cụ khoa học tổng hợp được sử dụng để đơn giản hóa và đánh giá tổng thể chất lượng của một nguồn nước. WQI được tính toán từ một tập hợp các thông số chất lượng nước thông qua các công thức toán học, sau đó được biểu diễn bằng một thang điểm hoặc thang màu, giúp người dùng dễ dàng hiểu và so sánh.

a. Nguyên tắc xây dựng WQI

Việc xây dựng một chỉ số WQI cần tuân thủ một số nguyên tắc cơ bản để đảm bảo tính khoa học và hiệu quả:

- Tính phù hợp: Chỉ số WQI phải phù hợp với mục đích sử dụng nguồn nước (ví dụ: cấp nước sinh hoạt, nuôi trồng thủy sản).
- Tính chính xác: Kết quả của WQI phải phản ánh chính xác thực trạng chất lượng nước.
- Tính nhất quán: Chỉ số phải được tính toán bằng phương pháp thống nhất trên toàn hệ thống để có thể so sánh.

- Tính liên tục: Có thể áp dụng để đánh giá chất lượng nước trong các điều kiện khác nhau và các chuỗi thời gian dài.
- Tính sẵn có: Các thông số đầu vào để tính toán WQI phải có sẵn, dễ dàng thu thập.
- Tính so sánh: Kết quả WQI phải có thể so sánh được giữa các địa điểm và thời gian khác nhau.

b. Vai trò của WQI trong quản lý chất lượng nước

WQI đóng vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ các nhà quản lý và cộng đồng trong công tác quản lý tài nguyên nước:

- Phục vụ quá trình ra quyết định: WQI cung cấp một cơ sở định lượng để các nhà quản lý xác định các khu vực ô nhiễm ưu tiên cần xử lý và phân bổ nguồn lực tài chính hiệu quả.
- Phân vùng chất lượng nước: WQI giúp phân loại các vùng nước thành các cấp độ chất lượng khác nhau (ví dụ: tốt, trung bình, kém), hỗ trợ việc quy hoạch sử dụng đất và tài nguyên nước.
- Phân tích diễn biến: Bằng cách theo dõi WQI theo thời gian, có thể phân tích xu hướng biến đổi của chất lượng nước và dự báo các vấn đề tiềm ẩn.
- Công bố thông tin cho cộng đồng: WQI là một công cụ đơn giản để truyền đạt thông tin phức tạp về chất lượng nước đến công chúng, nâng cao nhận thức và khuyến khích sự tham gia của cộng đồng.

c. Các bước thiết lập WQI

Việc xây dựng một chỉ số WQI thường bao gồm bốn bước chính:

- **Bước 1: Lựa chọn thông số:** Các thông số được lựa chọn phụ thuộc vào mục đích sử dụng WQI và đặc điểm của nguồn nước. Thông thường, các thông số này được nhóm thành các nhóm chính bao gồm: oxy hòa tan, chất dinh dưỡng, các chỉ tiêu vi sinh (E. coli, Coliform), hóa chất độc hại (kim loại nặng, hóa chất bảo vệ thực vật) và các đặc tính vật lý.
- **Bước 2: Chuyển đổi các thông số về cùng thang đo:** Vì các thông số có đơn vị đo khác nhau, chúng cần được chuyển đổi về một thang điểm chung (ví dụ: từ 0 đến 100) để có thể so sánh và tính toán. Phương pháp phổ biến là sử dụng các "đường cong tỉ lệ" (rating curves).
- **Bước 3: Gán trọng số:** Đây là bước gây tranh cãi nhất.
    - Quan điểm 1: Mỗi thông số được gán một trọng số riêng, phản ánh mức độ quan trọng của nó đối với chất lượng nước.
    - Quan điểm 2: Các thông số được coi là có mức độ quan trọng như nhau, không cần gán trọng số riêng. Quan điểm này được ủng hộ bởi những người

cho rằng việc gán trọng số có thể gây sai lệch và làm mất tính khách quan của chỉ số, đặc biệt khi so sánh giữa các nguồn nước khác nhau.

- **Bước 4: Tính toán chỉ số WQI cuối cùng:** Sử dụng các công thức toán học (ví dụ: trung bình cộng, trung bình nhân có trọng số) để kết hợp các thông số đã được chuyển đổi và gán trọng số (nếu có) thành một chỉ số WQI cuối cùng.

d. Đánh giá theo WQI

Bảng dưới đây trình bày các giá trị của WQI và mức độ đánh giá tương ứng, giúp xác định mức độ phù hợp của nước cho từng mục đích sử dụng.

Bảng 1. Đánh giá chất lượng nước theo WQI

Giá trị WQI	Mức đánh giá chất lượng nước	Màu
91-100	Sử dụng tốt cho mục đích cấp nước sinh hoạt	
76-90	Sử dụng cho mục đích cập nước sinh hoạt nhưng cần cá biên pháp xử lý phù hợp	
51-75	Sử dụng cho mục đích tưới tiêu và các mục đích tương đương khác	
26-50	Sử dụng cho giao thông thủy và các mục đích tương đương khác	
10-25	Nước ô nhiễm nặng, cần các biện pháp xử lý trong tương lai	
<10	Nước nhiễm độc, cần có biện pháp khắc phục, xử lý	

e. Ưu điểm và hạn chế

Ưu điểm:

- Đơn giản hóa thông tin: WQI giúp thu gọn một lượng lớn dữ liệu phức tạp thành một con số duy nhất, dễ hiểu cho cả người không chuyên.
- Đánh giá tổng hợp: Chỉ số WQI phản ánh tác động tổng hợp của nhiều yếu tố lý, hóa, sinh, cung cấp cái nhìn toàn diện hơn so với việc đánh giá từng thông số riêng lẻ.

Hạn chế:

- Tính che khuất: WQI có thể che khuất các vấn đề nghiêm trọng của một thông số nếu các thông số khác có giá trị tốt.

- Tính mơ hồ: Một chỉ số WQI có thể được tạo ra từ nhiều sự kết hợp khác nhau của các thông số, gây khó khăn trong việc xác định nguyên nhân ô nhiễm chính.
- Tính không mềm dẻo: Việc áp dụng một công thức WQI có thể không phù hợp cho tất cả các loại nguồn nước hoặc mục đích sử dụng khác nhau.

f. Chỉ số chất lượng nước Việt Nam (VN-WQI)

VN-WQI là một chỉ số được phát triển đặc thù cho Việt Nam, được quy định tại Quyết định số 1460/TCMT ngày 12/11/2019. Chỉ số này phản ánh tổng thể chất lượng nước bằng cách kết hợp nhiều thông số khác nhau, cung cấp một công cụ hữu hiệu cho việc quản lý và giám sát môi trường nước mặt.

Các thông số được sử dụng để tính VN_WQI

VN-WQI được tính toán dựa trên 5 nhóm thông số chính, mỗi nhóm đại diện cho một khía cạnh của chất lượng nước:

- Nhóm I: pH - Chỉ số phản ánh tính axit hoặc kiềm của nước.
- Nhóm II: Hóa chất bảo vệ thực vật - Bao gồm các chất độc hại như Aldrin, BHC, Dieldrin, DDTs, Heptachlor và Heptachlorepoxide.
- Nhóm III: Kim loại nặng - Các kim loại độc hại như Asen (As), Cadimi (Cd), Chì (Pb), Crôm (VI), Đồng (Cu), Kẽm (Zn) và Thủy ngân (Hg).
- Nhóm IV: Các thông số hữu cơ và dinh dưỡng - Đây là nhóm bắt buộc phải có, bao gồm Oxy hòa tan (DO), Nhu cầu oxy sinh hóa (BOD_5), Nhu cầu oxy hóa học (COD), Tổng cacbon hữu cơ (TOC), $N\text{-}NH_4$, $N\text{-}NO_3$, $N\text{-}NO_2$, $P\text{-}PO_4$.
- Nhóm V: Thông số vi sinh - Bao gồm Coliform và E.coli, là chỉ báo của ô nhiễm phân.

Yêu cầu tính toán

Để tính toán VN-WQI, cần tuân thủ các quy tắc sau:

- Số liệu tính toán phải bao gồm tối thiểu 3/5 nhóm thông số, trong đó nhóm IV là bắt buộc.
- Trong nhóm IV, phải có tối thiểu 3 thông số để đảm bảo tính đại diện.
- Trường hợp thủy vực chịu tác động của các nguồn ô nhiễm đặc thù bắt buộc phải lựa chọn nhóm thông số đặc trưng tương ứng để tính toán (thủy vực chịu tác động của ô nhiễm thuốc BVTV bắt buộc phải có nhóm II, thủy vực chịu tác động của kim loại nặng bắt buộc phải có nhóm III).

Công thức tính toán VN_WQI cho từng thông số

Để chuẩn hóa các giá trị về cùng một thang đo, WQI cho từng thông số được tính bằng phương pháp nội suy tuyến tính.

Công thức tính toán WQI cho các thông số của nhóm III & IV (trừ DO) là:

$$WQI_{SI} = \frac{q_i - q_{i+1}}{BP_{i+1} - BP_i} (BP_{i+1} - C_p) + q_{i+1} \text{ (công thức 1)}$$

Trong đó:

- **Bp_i**: Nồng độ giới hạn dưới của giá trị thông số quan trắc, được quy định trong Bảng 2 và Bảng 3 tương ứng với mức i.
- **Bp_{i+1}**: Nồng độ giới hạn trên của giá trị thông số quan trắc, được quy định trong Bảng 2 và Bảng 3 tương ứng với mức i+1.
- **q_i**: Giá trị WQI ở mức i đã cho trong Bảng 2 và Bảng 3 tương ứng với giá trị BP_i
- **q_{i+1}**: Giá trị WQI ở mức i+1 đã cho trong bảng tương ứng với giá trị BP_{i+1}
- **C_p**: Giá trị thực tế của thông số quan trắc được đưa vào tính toán.

Bảng 2. Quy định các giá trị qi, BPi cho các thông số nhóm IV và V

i	qi		Giá trị BPi quy định đối với từng thông số							
		BOD_5	**COD**	**TOC**	**N- NH_4**	**N- NO_3**	**N-NO_2**	**P-PO_4**	**Coliform**	**E.coli**
			mg/L						MPN/100 mL	
1	100	≤4	≤10	≤4	<0,3	≤2	≤0,05	≤0,1	≤2.500	≤20
2	75	6	15	6	0,3	5	-	0,2	5.000	50
3	50	15	30	15	0,6	10	-	0,3	7.500	100
4	25	25	50	25	0,9	15	-	0,5	10.000	200
5	10	≥50	≥150	≥50	≥5	>15	>0,05	≥4	>10.000	>200

Bảng 3. Quy định các giá trị qi, BPi cho các thông số kim loại nặng (nhóm III)

i	qi	Giá trị BP_i quy định đối với từng thông số						
		As	**Cd**	**Pb**	**Cr^{6+}**	**Cu**	**Zn**	**Hg**
		mg/L						
1	**100**	≤0,01	<0,005	<0,02	≤0,01	≤0,1	≤0,5	<0,001
2	**75**	0,02	0,005	0,02	0,02	0,2	1,0	0,001
3	**50**	0,05	0,008	0,04	0,04	0,5	1,5	0,0015
4	**25**	0,1	0,01	0,05	0,05	1,0	2,0	0,002
5	**10**	>0,1	≥0,1	≥0,5	≥0,1	≥2	≥3	≥0,01

Tính toán WQI cho DO

Tính toán thông qua DO bão hòa

Bước 1: Tính giá trị DO bão hòa

$DO_{baohoa} = 14,652 - 0,41022T + 0,0079910T^2 - 0,000077774T^3$

T: nhiệt độ môi trường nước tại thời điểm quan trắc (đơn vị: ^0C).

Bước 2: Tính giá trị WQI_{DO}

$$WQI_{SI} = \frac{q_{i+1} - q_i}{BP_{i+1} - BP_i}\left(C_p - BP_i\right) + q_i$$ (công thức 2)

Trong đó: C_p: giá trị DO % bão hòa

BP_i, BP_{i+1}, q_i, q_{i+1} là các giá trị tương ứng với mức i, i+1 trong Bảng 4

Bảng 4. Quy định các giá trị BPi và qi đối với DO% bão hòa

i	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
BP_i	<20	20	50	75	88	112	125	150	200	>200
q_i	10	25	50	75	100	100	75	50	25	10

- Nếu DO% bão hòa < 20 hoặc DO% bão hòa > 200, thì $WQI_{DO} = 10$.
- Nếu 20 < DO% bão hòa < 88, thì WQI_{DO} tính theo công thức 2 và sử dụng Bảng 4.
- Nếu 88 ≤ DO% bão hòa ≤ 112, thì $WQI_{DO} = 100$.
- Nếu 112 < DO% bão hòa < 200, thì WQI_{DO} tính theo công thức 1 và sử dụng Bảng 4.

Đối với thông số pH

Bảng 5. Quy định các giá trị BPi và qi đối với thông số pH

i	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
BP_i	< 5,5	5,5	6	8,5	9	> 9
q_i	10	50	100	100	50	10

- Nếu pH < 5,5 hoặc pH > 9, thì $WQI_{pH} = 10$.
- Nếu 5,5 < pH < 6, thì WQI_{pH} tính theo công thức 2 và sử dụng Bảng 5.
- Nếu 6 ≤ pH ≤ 8,5, thì WQI_{pH} bằng 100.
- Nếu 8,5 < pH < 9, thì WQI_{pH} được tính theo công thức 1 và sử dụng Bảng 5.

Đối với các thông số nhóm II: Aldrin, BHC, Dieldrin, DDTs, Heptachlor & Heptachlorepoxide

Thông số	Giá trị quan trắc *(Đơn vị: µg/l)*	WQI_{SI}
Aldrin	≤ 0,1	100
	>0,1	10
Benzene hexachloride (BHC)	≤0,02	100
	>0,02	10
Dieldrin	≤0,1	100
	>0,1	10
Tổng Dichloro diphenyl trichloroethane (DDT_S)	≤1,0	100
	>1,0	10
Heptachlor & Heptachlorepoxide	≤0,2	100
	>0,2	10

Tính toán WQI

Sau khi tính toán WQI đối với từng thông số nêu trên, tính toán WQI cuối cùng được áp dụng theo công thức sau:

$$WQI = \frac{WQI_I}{100} \times \frac{\left(\prod_{i=1}^{n} WQI_{II}\right)^{1/n}}{100} \times \frac{\left(\prod_{i=1}^{m} WQI_{III}\right)^{1/m}}{100} \times \left[\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} WQI_{IV} \times \frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l} WQI_V\right]^{1/2}$$ (công thức 3)

Trong đó:

WQII: Kết quả tính toán đối với thông số nhóm I

WQIII: Kết quả tính toán đối với các thông số nhóm II

WQIIII: Kết quả tính toán đối với các thông số nhóm III

WQIIV: Kết quả tính toán đối với các thông số nhóm IV

WQIV: Kết quả tính toán đối với thông số nhóm V

Chú ý : Nếu không có số liệu của nhóm thông số V thì công thức tính toán WQI cuối cùng như sau:

$$WQI = \frac{WQI_I}{100} \times \frac{\left(\prod_{i=1}^{n} WQI_{III}\right)^{1/n}}{100} \times \frac{\left(\prod_{i=1}^{m} WQI_{III}\right)^{1/m}}{100} \times \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} WQI_{IV}$$ (công thức 4)

Đối với thủy vực cần chú ý vấn đề ô nhiễm hữu cơ, tính toán WQI với trọng số của nhóm thông số theo Bảng 6 (tương ứng công thức 5)

Bảng 6. Quy định trọng số của các nhóm thông số

Nhóm thông số	Nhóm IV	Nhóm V
Trọng số	2	1

$$WQI = \frac{WQI_I}{100} \times \frac{\left(\prod_{i=1}^{n} WQI_{II}\right)^{1/n}}{100} \times \frac{\left(\prod_{i=1}^{m} WQI_{III}\right)^{1/m}}{100} \times \left[\left(\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} WQI_{IV}\right)^2 \times \frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l} WQI_V\right]^{1/3}$$ (công thức 5)

Ghi chú: Giá trị WQI sau khi tính toán sẽ được làm tròn thành số nguyên.

2.3 Phương pháp quan trắc chất lượng nước mặt

2.3.1 Một số khái niệm

a. Quan trắc môi trường

Quan trắc môi trường là quá trình theo dõi có hệ thống về môi trường, các yếu tố tác động lên môi trường nhằm cung cấp thông tin phục vụ đánh giá hiện trạng, diễn biến chất lượng môi trường và các tác động xấu đối với môi trường (Luật BVMT 2020).

Quan trắc môi trường chỉ một quy trình lặp đi lặp lại các hoạt động quan sát và đo lường một hay nhiều thông số chất lượng môi trường, để có thể quan sát được những thay đổi diễn ra trong một giai đoạn thời gian (ESCAP, 1994)

b. Chương trình quan trắc môi trường

Chương trình quan trắc môi trường là một quy trình khoa học, có hệ thống nhằm theo dõi và đánh giá chất lượng môi trường theo thời gian và không gian. Dưới đây là các bước chính cấu thành một chương trình quan trắc môi trường hiệu quả.

Thiết kế mạng lưới quan trắc

Đây là bước đầu tiên và quan trọng nhất, quyết định tính hiệu quả của toàn bộ chương trình. Việc thiết kế mạng lưới bao gồm xác định số lượng, vị trí và tần suất lấy mẫu phù hợp. Các điểm lấy mẫu phải được chọn lọc kỹ lưỡng để đại diện cho toàn bộ khu vực nghiên cứu, bao gồm cả các nguồn gây ô nhiễm tiềm tàng và các điểm nhạy cảm. Việc thiết kế mạng lưới cần dựa trên các yếu tố như đặc điểm thủy văn, địa chất, các nguồn thải, và mục tiêu của chương trình quan trắc.

Thu thập mẫu và đo đạc hiện trường

Sau khi mạng lưới được thiết lập, việc thu thập mẫu và đo đạc được thực hiện theo kế hoạch đã đề ra. Quá trình này bao gồm hai hoạt động song song:

- Thu thập mẫu: Mẫu nước được lấy từ các điểm đã được xác định, đảm bảo tuân thủ các quy trình kỹ thuật để tránh nhiễm bẩn và thay đổi tính chất của mẫu. Mẫu sau đó được bảo quản đúng cách để vận chuyển về phòng thí nghiệm.
- Đo đạc hiện trường: Một số thông số không ổn định (như nhiệt độ, pH, oxy hòa tan DO, độ đục) cần được đo đạc ngay tại chỗ để đảm bảo kết quả chính xác. Các thiết bị đo chuyên dụng cầm tay được sử dụng cho mục đích này.

Phân tích mẫu ở phòng thí nghiệm

Các mẫu nước đã thu thập được vận chuyển về phòng thí nghiệm chuyên ngành để phân tích các chỉ tiêu phức tạp hơn. Phòng thí nghiệm sử dụng các thiết bị hiện đại và tuân thủ các phương pháp phân tích tiêu chuẩn để xác định nồng độ các chất ô nhiễm như BOD, COD, kim loại nặng, hóa chất bảo vệ thực vật, và các chỉ tiêu vi sinh.

Xử lý dữ liệu

Sau khi có kết quả từ phòng thí nghiệm và các số liệu đo đạc tại hiện trường, bước tiếp theo là xử lý dữ liệu. Giai đoạn này bao gồm việc nhập liệu, kiểm tra tính hợp lệ của dữ liệu, loại bỏ các giá trị bất thường và tổ chức dữ liệu thành các định dạng phù hợp để phân tích. Việc sử dụng các phần mềm chuyên dụng giúp tăng tốc độ và độ chính xác của quá trình này.

Phân tích dữ liệu

Đây là bước cuối cùng và mang tính quyết định của chương trình. Dữ liệu đã được xử lý sẽ được phân tích sâu để đưa ra các kết luận về chất lượng nước. Quá trình phân tích bao gồm:

- So sánh với quy chuẩn: So sánh các giá trị đo được với các Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia (QCVN) để xác định mức độ đạt chuẩn.
- Phân tích xu hướng: Phân tích sự thay đổi của các thông số theo thời gian để nhận diện các xu hướng ô nhiễm dài hạn.
- Đánh giá tổng hợp: Tính toán các chỉ số chất lượng nước tổng hợp (như WQI) để có cái nhìn toàn diện về tình trạng nguồn nước.

Kết quả của quá trình phân tích dữ liệu là cơ sở để lập báo cáo, đưa ra các cảnh báo và đề xuất các biện pháp quản lý phù hợp nhằm bảo vệ và cải thiện chất lượng môi trường nước.

c. Trạm quan trắc và Mạng lưới quan trắc

Để đảm bảo tính liên tục và hệ thống, việc theo dõi, quan trắc môi trường được thực hiện tại các vị trí đặc biệt, gọi là trạm quan trắc. Với các chương trình quan trắc trên diện tích lớn, nhiều trạm quan trắc được bố trí và hoạt động đồng thời, tạo thành một mạng lưới quan trắc, đảm bảo độ phủ của dữ liệu.

Yêu cầu đối với trạm quan trắc:

- **Tính đại diện:** Mẫu thu được phải đại diện cho đặc trưng về chất lượng môi trường của khu vực nghiên cứu.
- **Khoảng cách tới phòng thí nghiệm:** Thời gian chuyển mẫu phải đủ ngắn để các thông số phân tích không bị thay đổi.
- **Không bị ảnh hưởng pha tạp:** Vị trí trạm phải tránh những nơi có các yếu tố gây sai lệch kết quả (ví dụ: ngay sau đập nước, nơi DO cao do xáo trộn nên không đặc trưng cho nguồn nước).

Các loại trạm quan trắc:

- Theo mục tiêu thông tin: Trạm cơ sở (theo dõi chất lượng nền), trạm tác động (theo dõi khu vực chịu ảnh hưởng của nguồn thải), trạm xu hướng (theo dõi diễn biến dài hạn).
- Theo đối tượng: Trạm quan trắc chất lượng nước mặt, nước ngầm, v.v.
- Theo hình thức hoạt động: Trạm cố định (tọa độ lấy mẫu, đo là xác định), trạm di động (tọa độ lấy mẫu, đo có thể thay đổi), và trạm tự ghi (tự động thu thập dữ liệu liên tục).

2.3.2 Những lưu ý trong thực hiện quan trắc

a. Lựa chọn vị trí quan trắc

Đối với nước sông, suối:

- Quan trắc chất lượng nền:
  - Lấy mẫu ở các vị trí thượng lưu, chưa chịu tác động của nguồn thải.
  - Nếu có các nhánh sông hợp lưu, chọn điểm sau khi nước đã trộn đều.
  - Chọn vị trí phân bố đều vực nước, đại diện cho các đặc điểm thủy văn khác nhau.
  - Vị trí chọn sao cho dễ tiếp cận.
- Quan trắc tác động:
  - Lấy mẫu ở hạ lưu các nguồn thải sau khi nước đã được trộn lẫn hoàn toàn.
  - Khi một nhánh sông hợp lưu vào dòng chính, việc quan trắc cần được thực hiện tại ít nhất hai điểm: một điểm ở thượng lưu nơi rẽ nhánh và một điểm ở hạ lưu. Điểm ở hạ lưu phải đủ xa để đảm bảo nước từ hai dòng đã được trộn lẫn hoàn toàn. Sự trộn lẫn theo chiều thẳng đứng thường hoàn thành trong phạm vi khoảng 1 km. Sự trộn lẫn theo chiều ngang phụ thuộc vào các khúc ngoặt của dòng sông và thường mất vài km để hoàn thành.
  - Nếu các sông bị ảnh hưởng triều thì cần phải nắm rõ chế độ triều và lấy mẫu khi triều kiệt

Đối với nước hồ:

- Tùy thuộc vào tính đồng nhất của hồ để quyết định số điểm lấy mẫu.
- Lưu ý sự phân tầng nhiệt độ có thể xảy ra theo chiều sâu.
- Cần quan tâm đến kích thước, hình dạng hồ và các điểm nhận thải.

b. Lựa chọn thông số quan trắc

Lựa chọn thông số: Tùy thuộc vào mục tiêu quan trắc (đánh giá chất lượng nền, xu hướng diễn biến chất lượng nước, đánh giá do ô nhiễm nguồn thải), mục đích sử dụng nước (sinh hoạt, công nghiệp, nuôi trồng thủy sản) và đặc điểm của đối tượng quan trắc (sông lớm, sông nhỏ, hồ, đầm phá, dòng chảy…). Các thông số thường được quy định trong các QCVN liên quan.

Khi thực hiện quan trắc chất lượng nước, các thông số cơ bản luôn được theo dõi bao gồm: Nhiệt độ, độ dẫn điện, pH, DO, SS.

Đối với các nguồn nước có tiếp nhận chất thải, các thông số quan trắc được lựa chọn chuyên biệt hơn để đánh giá các loại ô nhiễm cụ thể:

- Các chỉ tiêu chính để đánh giá mức độ ô nhiễm hữu cơ là: COD, BOD, TOC, nitơ hữu cơ, tổng phốt pho, vi khuẩn Coliforms.
- Để đánh giá hiện tượng phú dưỡng, các thông số quan trọng cần theo dõi là các dạng của nitơ: Nitrat NO_3^-, Nitrit NO_2^-, Amoni NH_4^+, tổng phốt pho và diệp lục tố (chlorophyll a)
- Nguồn nước bị ảnh hưởng bởi hoạt động nông nghiệp thường được đánh giá qua các chỉ tiêu như: Nitrat NO_3^- , Phốt phát PO_4^{3-} và dư lượng của các loại thuốc trừ sâu.
- Nước thải công nghiệp: Các thông số quan trắc đối với nước thải công nghiệp rất đa dạng, tùy thuộc vào loại hình sản xuất của nhà máy. Ví dụ, nhà máy dệt nhuộm cần quan trắc màu sắc và các hóa chất đặc thù, trong khi nhà máy xi mạ cần quan trắc hàm lượng kim loại nặng như Crôm (Cr), Niken (Ni), và Kẽm (Zn).

c. Tần suất lấy mẫu

Cần đủ dày để đánh giá các biến động chu kỳ (ngày-đêm, theo mùa) của các thông số chất lượng môi trường. Về nguyên tắc, tần suất lấy mẫu càng dày, độ chính xác càng cao, nhưng cần tối ưu hóa để phù hợp với chi phí và nguồn lực.

- Đối với các chương trình quan trắc dài hạn (>1 năm): tần suất 3-4 tháng/lần
- Đối với chương trình quan trắc kiểm soát: tần suất dày hơn, hàng tháng hoặc hàng tuần
- Trường hợp cực đoan, sự cố môi trường: lấy mẫu hằng ngày hoặc lấy mẫu liên tục, mẫu tổ hợp theo thời gian.

d. Lấy mẫu

Lấy mẫu là một quá trình khoa học, trong đó một phần nhỏ vật chất được thu thập để phân tích. Lượng mẫu phải đủ nhỏ để dễ vận chuyển, nhưng cũng phải đủ lớn để đáp ứng các yêu cầu phân tích. Điều quan trọng nhất là mẫu phải đại diện chính xác cho toàn bộ khối vật chất được lấy mẫu.

Tính đại diện của mẫu

Tính đại diện về thành phần: Nồng độ tương đối của tất cả các thành phần trong mẫu phải tương tự như trong vật chất gốc. Điều này đảm bảo kết quả phân tích phản ánh đúng hiện trạng của nguồn nước tại thời điểm lấy mẫu. Vì vậy, mẫu được xử lý và bảo quản đúng cách để ngăn chặn bất kỳ thay đổi nào về thành phần hoặc nồng độ trước khi phân tích.

Các dạng mẫu nước

- **Mẫu đơn:** Là mẫu riêng lẻ, gián đoạn được lấy từ một điểm đặc biệt trong một thời gian ngắn (vài giây đến vài phút). Mỗi mẫu thường chỉ đại diện cho chất lượng nước ở thời điểm và địa điểm được lấy mẫu. Các trường hợp lấy mẫu đơn:
  - Nguồn có sự trộn lẫn đồng nhất theo thời gian và không gian.
  - Nghiên cứu khả năng xuất hiện ô nhiễm hoặc giám sát sự phân tán chất ô nhiễm.
  - Khi xác định những thông số không ổn định như nồng độ các chất khí hoà tan, clo dư, sunfua tan: Fecal coliforms, VOC, NH_3 tự do luôn lấy mẫu đơn.
- **Mẫu tổ hợp:** Là mẫu trộn lẫn các mẫu đơn hoặc các phần mẫu đơn với nhau theo tỷ lệ thích hợp đã biết trước (gián đoạn hoặc liên tục). Cung cấp mẫu đại diện cho các đối tượng quan trắc không đồng nhất, trong đó nồng độ của chất cần phân tích biến động trong các khoảng thời gian hay không gian ngắn. Các dạng mẫu tổ hợp:
  - Tổ hợp theo thời gian (Sequential/Time composite samples)
  - Tổ hợp theo không gian (Spatial composite samples)
  - Tổ hợp theo lưu lượng dòng chảy (Flow-proportional composites)

Ưu và nhược điểm của mẫu tổ hợp

- **Ưu điểm**
  - Giảm chi phí phân tích: Việc gộp nhiều mẫu đơn thành một mẫu tổ hợp giúp giảm đáng kể số lượng mẫu cần phân tích trong phòng thí nghiệm, từ đó tiết kiệm chi phí và thời gian.
  - Tăng tính đại diện: Mẫu tổ hợp cung cấp cái nhìn tổng quan và đại diện hơn về chất lượng nước trong một khoảng thời gian hoặc một khu vực nhất định, đặc biệt đối với các nguồn nước có nồng độ chất ô nhiễm biến động liên tục.

- Khắc phục giới hạn thể tích: Trong trường hợp lượng mẫu thành phần bị giới hạn, việc gộp chúng lại sẽ tạo ra một thể tích mẫu đủ lớn để thực hiện các phân tích cần thiết.

- **Hạn chế**
  - Mất thông tin chi tiết: Mẫu tổ hợp làm mất đi các mối quan hệ và sự biến động tức thời của các thông số trong các mẫu đơn. Điều này có thể che khuất các đỉnh nồng độ ô nhiễm ngắn hạn nhưng nghiêm trọng.
  - Nguy cơ pha loãng: Khi nồng độ của một chất ô nhiễm trong mẫu đơn quá thấp, việc trộn lẫn với các mẫu khác có thể làm pha loãng nó xuống dưới ngưỡng phát hiện của thiết bị phân tích.
  - Tương tác hóa học: Khả năng các chất phân tích trong các mẫu đơn khác nhau phản ứng với nhau hoặc với chất bảo quản, gây ra các tương tác hóa học không mong muốn và làm sai lệch kết quả.
  - Hạn chế về thống kê: Việc giảm số lượng mẫu phân tích có thể không đáp ứng được yêu cầu về mặt thống kê, đặc biệt đối với các nghiên cứu cần độ chính xác cao hoặc các mục tiêu dự kiến cụ thể.

e. Bảo quản mẫu

Mục đích của việc bảo quản mẫu là giảm thiểu các thay đổi vật lý (bay hơi, phân tán, hấp phụ bề mặt), hóa học (phản ứng quang hóa, hấp thụ khí, oxi hóa, kết tủa) và sinh học (phân hủy sinh học, phản ứng enzym) xảy ra sau khi lấy mẫu. Các phương pháp bảo quản phổ biến bao gồm làm lạnh, sử dụng dụng cụ chứa mẫu thích hợp và thêm chất bảo quản.

Các lưu ý về thời gian bảo quản mẫu

Thời gian bảo quản mẫu nước từ khi lấy mẫu đến khi phân tích trong phòng thí nghiệm cần được tuân thủ nghiêm ngặt để giảm thiểu các thay đổi hóa học, vật lý và sinh học. Mỗi thông số có một thời gian bảo quản tối đa khác nhau.

- **Thời gian bảo quản ngắn:** Một số thông số rất dễ bị thay đổi và cần được phân tích ngay tại hiện trường hoặc trong vòng vài giờ sau khi lấy mẫu. Ví dụ:
  - DO, pH, nhiệt độ: Cần đo ngay tại hiện trường.
  - Vi sinh vật: Phải được phân tích trong vòng 6-8 giờ.
  - Các hợp chất dễ bay hơi: Cần phân tích trong vòng 7 ngày.
- **Thời gian bảo quản trung bình:** Các thông số này có thể được bảo quản trong vài ngày đến một vài tuần.
  - BOD_5: Tối đa 48 giờ.
  - COD: Tối đa 28 ngày.

- Nitrat, Nitrit: Tối đa 48 giờ.

- **Thời gian bảo quản dài:** Một số kim loại nặng và các hợp chất vô cơ có thể được bảo quản trong thời gian dài hơn. Ví dụ, các mẫu chứa kim loại nặng có thể được bảo quản tối đa 6 tháng nếu tuân thủ đúng quy trình bảo quản.

f. Đo đạc hiện trường

Đo đạc hiện trường: Để đảm bảo tính chính xác, các thông số không ổn định của nước như nhiệt độ, pH, oxy hòa tan (DO) và độ đục phải được đo ngay tại hiện trường. Quá trình này được thực hiện bằng các thiết bị cảm biến (sensor) chuyên dụng, giúp thu thập dữ liệu tức thời và tin cậy, tránh các sai số có thể xảy ra trong quá trình vận chuyển và bảo quản mẫu.

Một số lưu ý khi đo đạc hiện trường:

- Nên đo các thông số hiện trường trên mẫu đơn.
- Luôn phải kiểm chuẩn máy đo theo các hướng dẫn.
- Ghi chú các điều kiện khi đo (nhiệt độ khí quyển, thời tiết,…)

g. Phân tích mẫu trong phòng thí nghiệm

Phân tích mẫu: Các mẫu đã được bảo quản sẽ được phân tích trong phòng thí nghiệm bằng các phương pháp tiêu chuẩn quốc tế (APHA) hoặc tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN) để xác định nồng độ các chất ô nhiễm.

Một số lưu ý khi phân tích mẫu trong phòng thí nghiệm:

- Với các mẫu bảo quản ở nhiệt độ thấp phải đưa về nhiệt độ phòng trước khi phân tích.
- Trộn đều mẫu ngay trước khi phân tích.
- Luôn phải tuân thủ các quy trình đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC) trong quá trình phân tích.

2.3.3 Quan trắc liên tục, tự động

Trạm quan trắc liên tục là một hệ thống tự động, hoạt động 24/7 để theo dõi các thông số môi trường tại một vị trí cố định. Các trạm này cung cấp dữ liệu theo thời gian thực, giúp giám sát và cảnh báo sớm các vấn đề ô nhiễm.

a. Các nhóm thiết bị chính

- Thiết bị lấy mẫu và đo: Bao gồm bơm và các cảm biến (sensor) chuyên dụng để thu thập và đo lường các thông số.
- Thiết bị lưu trữ dữ liệu: Gồm các bộ ghi dữ liệu (data logger) để lưu trữ các thông số đã đo được trước khi truyền đi.

- Thiết bị truyền dữ liệu: Sử dụng công nghệ viễn thông (telemetry) để truyền dữ liệu về trung tâm quản lý.
- Hệ thống kiểm chuẩn và bảo dưỡng: Đảm bảo các sensor hoạt động chính xác và kéo dài tuổi thọ của thiết bị.

b. Phân loại các loại quan trắc liên tục

Các trạm quan trắc liên tục có thể được phân loại dựa trên hai tiêu chí chính:

Theo kiểu xây dựng trạm:

- Trạm cố định trên bờ: Được xây dựng kiên cố trên bờ sông, hồ hoặc kênh, thích hợp cho việc quan trắc dài hạn.
- Trạm phao nổi: Được lắp đặt trên các phao nổi giữa thủy vực, phù hợp cho việc quan trắc các hồ lớn hoặc khu vực có dòng chảy mạnh.

Theo phương thức sensor tiếp xúc với mẫu:

- Hệ thống dòng mẫu (flow-through): Nước được bơm lên từ nguồn và chảy qua một buồng chứa sensor. Phương pháp này giúp bảo vệ sensor khỏi các tác động trực tiếp của môi trường.
- Hệ thống nhúng trực tiếp (in-situ): Sensor được nhúng trực tiếp vào vực nước. Phương pháp này cho phép đo đạc tức thời, nhưng sensor dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường như bám bẩn hoặc ăn mòn.

c. Các thông số quan trắc tự động

Các trạm quan trắc tự động có khả năng đo lường và tính toán nhiều thông số khác nhau:

- Các thông số trực tiếp: Các chỉ số được đo trực tiếp bằng sensor bao gồm nhiệt độ, pH, độ dẫn điện (EC), độ đục (Tur), oxy hòa tan (DO), thế oxy hóa khử (ORP), ion Cl^-, NH_4^+ và NO_3^-…
- Các thông số tính toán: Một số thông số được tính toán dựa trên các dữ liệu trực tiếp, ví dụ như Tổng chất rắn hòa tan (TDS), độ mặn và % DO bão hòa...
- Các thông số thủy văn: Bao gồm áp suất cột nước (để tính độ sâu) và vận tốc dòng chảy…

d. Các vấn đề thường gặp đối với quan trắc tự động

Quá trình vận hành các trạm quan trắc tự động, mặc dù hiệu quả, vẫn đối mặt với nhiều thách thức đáng kể. Dưới đây là các vấn đề thường gặp được phân loại theo ba nhóm chính: kỹ thuật, bảo dưỡng và an toàn.

Các vấn đề kỹ thuật

- Hiệu chuẩn thường xuyên: Để đảm bảo độ chính xác của dữ liệu, các cảm biến (sensor) cần được hiệu chuẩn định kỳ. Mọi sai lệch trong quá trình hiệu chuẩn đều có thể dẫn đến kết quả phân tích không đáng tin cậy.
- Dung lượng bộ nhớ hạn chế: Các bộ ghi dữ liệu (data logger) có dung lượng bộ nhớ giới hạn, đòi hỏi việc truyền dữ liệu về trung tâm phải được thực hiện định kỳ, nếu không sẽ dẫn đến việc mất dữ liệu.
- Nguồn điện cần ổn định: Hệ thống quan trắc tự động yêu cầu một nguồn điện ổn định và liên tục để hoạt động. Sự cố về điện có thể làm gián đoạn quá trình thu thập dữ liệu.

Vấn đề bảo dưỡng

- Bám bẩn sinh học: Sensor nhúng trực tiếp trong nước rất dễ bị bám bởi các sinh vật như tảo, rong rêu. Lớp bám này làm giảm độ nhạy và gây sai lệch kết quả đo.
- Vùi lấp: Tại các khu vực có dòng chảy chậm hoặc nhiều trầm tích, sensor có thể bị vùi lấp bởi bùn, cát, làm mất khả năng đo lường.
- Ăn mòn: Tiếp xúc lâu dài với nước mặn hoặc các hóa chất trong nước thải có thể gây ăn mòn, làm hỏng các bộ phận của sensor và thiết bị.

Vấn đề an toàn

- Nguy cơ mất cắp hoặc phá hoại: Các trạm quan trắc thường được đặt ở các vị trí lộ thiên, dễ bị mất cắp hoặc phá hoại bởi các yếu tố bên ngoài.
- Hư hỏng do thiên tai: Thiết bị có thể bị hư hỏng do các sự cố bất ngờ như lũ lụt, sạt lở hoặc sét đánh.

3 KIỂM KÊ, ĐÁNH GIÁ NGUỒN THẢI VÀO MÔI TRƯỜNG NƯỚC

3.1 Tổng quan về kiểm kê nguồn thải

3.1.1 Giới thiệu chung về kiểm kê nguồn thải

Khái niệm chung:

"**Kiểm kê**" thường được sử dụng trong lĩnh vực quản lý và bảo vệ môi trường với ý nghĩa "danh sách các vấn đề môi trường được chia nhóm nhằm cung cấp dữ liệu và thông tin phục vụ kiểm soát và quản lý môi trường".

Có nhiều loại kiểm kê khác nhau tùy theo nhu cầu người sử dụng cuối cùng: kiểm kê nguồn nước thải, kiểm kê khí thải, kiểm kê tài nguyên nước quốc gia, kiểm kê khí thải nhà kính…

Kiểm kê nguồn nước thải: là một danh sách tổng hợp nguồn ô nhiễm có chất gây ô nhiễm nước và ước tính tải lượng của nó trong một không gian địa lý cụ thể với một khoảng thời gian cụ thể. Kiểm kê nguồn nước thải là một dạng cơ sở dữ liệu được xây dựng tập trung vào thông tin liên quan đến nguồn ô nhiễm.

Kiểm kê nguồn nước thải lưu vực sông là một danh sách tổng hợp nguồn nước thải và ước tính xả thải của nó vào lưu vực sông cụ thể với khoảng thời gian cụ thể. Kiểm kê nguồn nước thải lưu vực sông có chức năng như một công cụ hỗ trợ cho các mục tiêu sau:

- Nhận biết các nguồn ô nhiễm sẽ được kiểm soát trong khu vực mục tiêu,
- Thiết lập tổng tải lượng ô nhiễm cần giảm
- Xây dựng chiến lược quản lý/ kiểm soát chất lượng nước
- So sánh ước tính tải lượng ô nhiễm trước & sau khi thực hiện kế hoạch quản lý môi trường nước

3.1.2 Phân loại nguồn thải theo quan điểm kiểm kê

Nguồn điểm là một điểm xả nước thải cục bộ duy nhất chứa một hoặc nhiều chất ô nhiễm.

Những nguồn điểm quan trọng nhất là các cơ sở công nghiệp, nhà máy xử lý nước thải (mặc dù nói một cách nghiêm ngặt thì bản thân nhà máy không phải là nguồn thải), nước thải chưa qua xử lý, hệ thống xử lý chất thải và các địa điểm khai thác mỏ.

Nguồn diện được định nghĩa là nhiều nguồn nhỏ hơn hoặc phân tán mà từ đó các chất ô nhiễm có thể được thải ra đất, không khí hoặc nước, tác động kết hợp của chúng lên các môi trường đó có thể rất đáng kể.

Các nguồn diện bao gồm các hoạt động nông nghiệp, một số phát thải liên quan đến đô thị, lắng đọng trong khí quyển và nhà ở nông thôn. Thông thường, nguồn diện thay đổi nhiều hơn về không gian và thời gian so với các nguồn điểm.

3.1.3 Một số khái niệm liên quan đến kiểm kê

Hệ số phát thải (EF): là tỉ số chỉ lượng phát thải của chất ô nhiễm trong một khoảng thời gian cụ thể tương ứng với một mức độ hoạt động của loại hình nguồn thải mà hoạt động đó có thể đo đạc dễ dạng như lượng nguyên vật liệu được chế biến hay lượng sản phẩm tạo thành.

Mức độ hoạt động của nguồn thải (A) biểu thị quy mô của hoạt động tạo ra chất thải có thể là

- Công suất hoạt động
- Tiêu hao nguyên liệu

Lượng phát thải: $L = EF \times A$

Tải trọng sông mô tả khối lượng của một chất gây ô nhiễm được vận chuyển trên một đơn vị thời gian, thường được biểu thị bằng kg hoặc tấn mỗi năm.

3.1.4 Vai trò của kiểm kê nguồn thải trong quản lý chất lượng nước

Kiểm kê nguồn thải là công cụ hỗ trợ trong việc lập, thực hiện và đánh giá kế hoạch quản lý môi trường nước. Quản lý môi trường nước thường diễn ra theo chu trình liên tục: Lập kế hoạch → Thực hiện → Đánh giá → Điều chỉnh. Kiểm kê nguồn thải tham gia và hỗ trợ tất cả các giai đoạn này.

a. Giai đoạn lập kế hoạch

Vai trò của kiểm kê nguồn thải:

- Cung cấp dữ liệu nền tảng về hiện trạng ô nhiễm
  - Ghi nhận ai xả thải, xả ở đâu, xả bao nhiêu và xả loại chất gì (BOD, COD, N, P, kim loại nặng...).
  - Giúp định lượng tải lượng ô nhiễm tổng vào sông, hồ hoặc lưu vực.
- Xác định và khoanh vùng các "điểm nóng" ô nhiễm
  - Khi so sánh vị trí nguồn thải với dữ liệu quan trắc chất lượng nước, có thể xác định khu vực ưu tiên xử lý trước.
  - Ví dụ: phát hiện khu công nghiệp chiếm 60% lượng COD đổ vào sông, từ đó tập trung biện pháp kiểm soát.
- Làm cơ sở xây dựng mục tiêu và chỉ tiêu quản lý
  - Kiểm kê cho phép ước tính tải lượng cần giảm để đạt mục tiêu chất lượng nước.

- Đây là nền tảng để thiết kế Tổng tải lượng ô nhiễm tối đa hàng ngày hoặc các mục tiêu giảm ô nhiễm cụ thể.

- Hỗ trợ lựa chọn chiến lược tối ưu
  - Khi biết tỷ lệ đóng góp ô nhiễm của từng nguồn, có thể so sánh chi phí – hiệu quả của các phương án xử lý khác nhau.
  - Ví dụ: giảm 30% ô nhiễm từ 5 nhà máy lớn có thể hiệu quả hơn so với xử lý hàng trăm nguồn nhỏ.

Như vậy, nếu không có kiểm kê nguồn thải, giai đoạn lập kế hoạch sẽ thiếu căn cứ khoa học, dẫn đến kế hoạch sai trọng tâm hoặc kém khả thi.

b. Giai đoạn thực hiện kế hoạch

Vai trò của kiểm kê nguồn thải:

- Ưu tiên nguồn lực và xác định vị trí hành động: Dựa vào danh mục nguồn thải, chính quyền có thể phân bổ nguồn lực hợp lý, ví dụ: ưu tiên thanh tra các cơ sở có nguy cơ ô nhiễm cao nhất.
- Hỗ trợ thiết kế mạng lưới quan trắc chất lượng nước: Kiểm kê xác định điểm xả chính, từ đó chọn vị trí, tần suất, chỉ tiêu quan trắc phù hợp, tiết kiệm chi phí và thời gian.
- Công cụ giám sát quá trình thực hiện: Kiểm kê được cập nhật thường xuyên để theo dõi việc giảm tải của từng cơ sở hoặc khu vực. Ví dụ: nếu kế hoạch yêu cầu giảm 20% COD trong năm 1, dữ liệu kiểm kê sẽ cho biết liệu cơ sở đã thực hiện đúng cam kết chưa.
- Hỗ trợ truyền thông và minh bạch thông tin: Công khai một phần dữ liệu kiểm kê giúp cộng đồng, doanh nghiệp và chính quyền cùng giám sát, nâng cao trách nhiệm giải trình.

c. Giai đoạn đánh giá và điều chỉnh

Vai trò của kiểm kê nguồn thải:

- Đo lường kết quả đạt được: So sánh kiểm kê trước và sau khi thực hiện kế hoạch để đánh giá mức giảm tải lượng ô nhiễm. Giúp xác định liệu các biện pháp đã đạt mục tiêu đề ra chưa.
- Xác định nguyên nhân khi chất lượng nước chưa đạt chuẩn: Nếu quan trắc cho thấy nước vẫn ô nhiễm, kiểm kê sẽ giúp tìm ra liệu có nguồn thải chưa kiểm soát được, hoặc nguồn mới chưa được thống kê.
- Cập nhật và điều chỉnh chiến lược: Kiểm kê đóng vai trò phản hồi, thông tin mới được đưa trở lại giai đoạn lập kế hoạch, điều chỉnh chính sách và biện pháp.

3.1.5 Cách tiếp cận trong kiểm kê nguồn ô nhiễm

Cấp độ 1: Kiểm kê nguồn điểm

- Tập trung chủ yếu vào các nguồn điểm như nhà máy, khu công nghiệp, cơ sở sản xuất, khu xử lý nước thải.
- Dữ liệu được sử dụng chủ yếu là thông tin thống kê từ các nguồn phát thải, bao gồm: loại hình sản xuất, công suất, lưu lượng xả thải và nồng độ các chất ô nhiễm.
- Mục tiêu chính là xác định và định lượng các nguồn xả thải trực tiếp vào sông, hồ hoặc hệ thống thủy vực.

Cấp độ 2: Phương pháp tiếp cận dựa trên tải lượng sông

- Tập trung vào tải lượng ô nhiễm trong dòng sông, dựa trên:
  - Nồng độ các chất ô nhiễm.
  - Dữ liệu lưu lượng dòng chảy để tính toán tổng tải lượng chất ô nhiễm.
- Xem xét các quá trình cơ bản ảnh hưởng đến sự biến đổi của chất ô nhiễm trong sông, bao gồm:
  - Vận chuyển
  - Lưu trữ hoặc lưu trữ tạm thời
  - Phân hủy hoặc biến đổi sinh hóa
- Mục tiêu là đánh giá mức độ ô nhiễm và khả năng chịu tải của sông, làm cơ sở thiết lập giới hạn xả thải.

Cấp độ 3: Phương pháp tiếp cận theo đường đi của chất ô nhiễm

- Xem xét quá trình di chuyển của chất ô nhiễm từ nguồn phát sinh đến nơi tiếp nhận, sử dụng thông tin cụ thể về:
  - Hiện trạng sử dụng đất (nông nghiệp, đô thị, công nghiệp…),
  - Đặc điểm thủy văn (mưa, dòng chảy bề mặt, dòng chảy ngầm),
  - Các quá trình vận chuyển cơ bản liên quan như rửa trôi, xâm nhập, hấp phụ và lắng đọng.
- Phương pháp này cho phép truy vết nguồn gốc và con đường phát tán ô nhiễm, phục vụ tốt cho việc kiểm soát ô nhiễm phi điểm như nước mưa chảy tràn, hoạt động nông nghiệp, và xói mòn đất.

Cấp độ 4: Phương pháp tiếp cận theo nguồn gốc

- Xem xét toàn bộ vòng đời của chất ô nhiễm, từ nguồn phát sinh ban đầu, qua các giai đoạn:
  - Phát thải vào môi trường,
  - Quá trình vận chuyển và biến đổi,

- Tác động đến hệ sinh thái và sức khỏe con người.

- Đây là cách tiếp cận toàn diện nhất, cung cấp bức tranh tổng thể về mối quan hệ giữa các hoạt động kinh tế - xã hội và chất lượng môi trường nước, từ đó hỗ trợ:
  - Hoạch định chính sách,
  - Xây dựng chiến lược kiểm soát ô nhiễm,
  - Đánh giá hiệu quả các biện pháp quản lý trong dài hạn.

3.2 Các phương pháp kiểm kê nguồn thải

3.2.1 Phương pháp nguồn điểm

- Đặc điểm: Tập trung vào các nguồn thải cố định, có vị trí xả thải xác định rõ ràng, như: nhà máy xử lý nước thải, cơ sở công nghiệp, bệnh viện, trạm bơm.
- Công thức tính toán:

$$\text{Tải lượng} = \text{Nồng độ} \times \text{Lưu lượng nước thải}$$

- Nguồn dữ liệu: Sử dụng dữ liệu thống kê sẵn có, cơ sở dữ liệu quốc gia hoặc khảo sát.
- Ưu, nhược điểm của phương pháp:
  - Ưu điểm: Độ chính xác cao do có thể đo đạc trực tiếp lưu lượng và nồng độ chất ô nhiễm; Phù hợp với quản lý và giám sát các cơ sở gây ô nhiễm lớn.
  - Nhược điểm: Phạm vi áp dụng hạn chế, không phản ánh được nguồn phân tán như nông nghiệp, đô thị, dòng chảy mặt; Không cung cấp bức tranh toàn diện về chất lượng nước trong lưu vực.

3.2.2 Phương pháp tải lượng sông

- Đặc điểm: Dựa trên nồng độ chất ô nhiễm kết hợp với lưu lượng dòng chảy của sông để tính tải lượng ô nhiễm tổng hợp tại một điểm đo.
- Công thức tính toán:

$$\mathbf{L_y = Q_d \times \frac{\sum(C_i \times Q_i \times U_f)}{Q_{meas}}}$$

Trong đó:

- L_y: tải lượng hằng năm (tấn/năm);
- Q_d lưu lượng trung bình ngày (m^3/s);
- Q_i: lưu lượng đo đạc (m^3/s)
- C_i: nồng độ (mg/L);

- U_f: hệ số hiệu chỉnh;
- n: số điểm đo

Tải lượng khuếch tán (Diffuse load):

Công thức cơ bản: $\mathbf{L_{Diff} = L_y - D_p}$

Công thức chi tiết: $\mathbf{L_{Diff} = L_y - D_p - L_B + N_P}$

Trong đó:

- L_{Diff}: tải lượng khuếch tán
- D_p: tải lượng từ nguồn điểm;
- L_B: tải nền tự nhiên;
- N_P: quá trình xảy ra trong sông (lắng đọng, phân hủy…)

- Ưu, nhược điểm của phương pháp:
  - Ưu điểm: Kiểm chứng chéo dữ liệu từ nhiều nguồn, phát hiện đóng góp từ nguồn phân tán.
  - Nhược điểm: Không phân biệt chi tiết các nguồn phân tán.

3.2.3 Phương pháp theo tiếp cận đường đi của chất ô nhiễm (Pathway-oriented)

Nguyên tắc

Phương pháp này tập trung phân tích các con đường mà chất ô nhiễm di chuyển từ nguồn phát sinh vào thủy vực, nhằm hiểu rõ các quá trình vận chuyển và biến đổi xảy ra trong môi trường. Qua đó, có thể xác định nguồn gốc, cơ chế lan truyền và mức độ tác động của chất ô nhiễm, phục vụ cho công tác kiểm soát và quản lý chất lượng nước.

Phân loại các con đường ô nhiễm chính

- ***Nguồn điểm (Point Sources):*** Là các nguồn thải có vị trí xả thải cố định, xác định rõ ràng, ví dụ: nhà máy xử lý nước thải, trạm bơm, mỏ khai thác.
  - Có thể đo đạc trực tiếp lưu lượng và nồng độ chất ô nhiễm tại điểm xả.
- ***Nguồn phân tán nông thôn (Rural Non-Point Sources)****:* Xuất phát từ các hoạt động sản xuất nông nghiệp và hiện tượng tự nhiên, bao gồm: xói mòn đất, dòng chảy mặt, thoát nước ngầm, bay hơi và lắng đọng từ khí quyển.
  - Công cụ tính toán: Sử dụng phương trình mất đất phổ dụng – USLE (Universal Soil Loss Equation) để ước tính tải lượng xói mòn, với các thông số chính: R – Hệ số mưa (Rainfall erosivity factor), K – Hệ số đặc tính đất, LS – Hệ số địa hình, C – Hệ số thảm phủ thực vật, P – Hệ số biện pháp canh tác và bảo vệ đất.

- ***Nguồn phân tán đô thị (Urban Non-Point Sources):*** Bao gồm các dòng thải phát sinh từ hoạt động đô thị, chủ yếu là: nước thải tràn hỗn hợp, hệ thống thoát nước mưa đô thị
    - Ước tính tải lượng ô nhiễm dựa trên: tải trọng bề mặt (kg/km²), lượng mưa và đặc tính hệ thống hạ tầng đô thị và mức độ bê tông hóa bề mặt.

Ưu, nhược điểm của phương pháp:

- Ưu điểm: Cung cấp thông tin chi tiết và cụ thể cho từng khu vực, đặc biệt hữu ích trong quản lý nguồn phân tán như nông nghiệp hoặc đô thị; Hỗ trợ truy vết và xác định cơ chế lan truyền ô nhiễm, từ đó đưa ra giải pháp quản lý phù hợp.
- Nhược điểm: Cần nhiều dữ liệu đầu vào, bao gồm: lượng mưa, địa hình, thảm phủ, hệ thống thoát nước, dữ liệu sử dụng đất… Đòi hỏi mô hình tính toán phức tạp và nguồn lực kỹ thuật cao.

3.2.4 Phương pháp theo tiếp cận nguồn gốc (Source-oriented)

Nguyên tắc: Phương pháp này tập trung phân tích toàn bộ dòng chảy của chất ô nhiễm từ các khâu: sản xuất – tiêu dùng – xử lý – thải ra môi trường, nhằm xác định nguồn gốc, điểm phát sinh, quy mô và xu hướng ô nhiễm. Qua đó, giúp nhận diện các mắt xích quan trọng để đề xuất biện pháp giảm thiểu phát thải một cách hiệu quả.

Công cụ chính: Phân tích dòng chảy vật chất (Substance Flow Analysis – SFA)

Phân tích dòng chảy vật chất là phương pháp theo dõi và định lượng sự di chuyển của một chất ô nhiễm cụ thể trong hệ thống kinh tế – xã hội – môi trường.

Công thức cân bằng khối lượng:

$$\text{Input} + \text{Formation} = \text{Output} + \text{Degradation} + \text{Accumulation}$$

Trong đó:

- Đầu vào (Input): Lượng chất đi vào hệ thống (nguyên liệu, sản phẩm nhập khẩu...).
- Hình thành (Formation): Lượng chất được tạo ra trong quá trình sản xuất hoặc phản ứng hóa học.
- Đầu ra (Output): Lượng chất rời khỏi hệ thống (sản phẩm xuất khẩu, chất thải...).
- Phân hủy (Degradation): Lượng chất bị phân hủy hoặc chuyển hóa thành dạng khác.
- Tích lũy (Accumulation): Lượng chất còn tồn đọng hoặc tích lũy trong hệ thống.

Ưu, nhược điểm của phương pháp

- Ưu điểm:
  - Cung cấp cái nhìn toàn diện về vòng đời và dòng chảy của chất ô nhiễm.
  - Hỗ trợ xây dựng chính sách và kế hoạch quản lý dựa trên việc xác định các khâu ưu tiên để giảm phát thải.
  - Phù hợp với quản lý chất ô nhiễm ở quy mô quốc gia hoặc lưu vực.
- Nhược điểm:
  - Yêu cầu dữ liệu chi tiết và cập nhật liên tục, bao gồm số liệu về sản xuất, tiêu dùng, xử lý và môi trường.
  - Đòi hỏi nguồn lực kỹ thuật và chuyên môn cao để xây dựng và duy trì hệ thống phân tích.

3.2.5 So sánh các phương pháp

Bảng dưới đây trình bày sự so sánh tổng quan giữa các phương pháp kiểm kê nguồn thải:

Bảng 7. So sánh các phương pháp kiểm kê nguồn thải

Tiêu chí	Nguồn điểm	Tải lượng sông	Đường đi của chất ô nhiễm	Nguồn gốc chất ô nhiễm
Phạm vi phản ánh	Hẹp, chỉ nguồn điểm	Trung bình, tổng tải lượng sông	Khu vực cụ thể, chi tiết	Toàn diện, bao quát toàn hệ thống
Độ chính xác	Rất cao	Cao	Cao (phụ thuộc dữ liệu)	Cao nếu dữ liệu đầy đủ
Dữ liệu yêu cầu	Ít, dễ thu thập	Trung bình	Nhiều, đa dạng	Rất lớn, phức tạp
Ứng dụng quản lý	Giám sát cơ sở, cấp phép xả thải	Đánh giá chất lượng nước lưu vực	Quản lý ô nhiễm phân tán, mô hình dự báo	Hoạch định chính sách, chiến lược dài hạn

3.3 Quy trình kiểm kê nguồn thải điểm

Quy trình kiểm kê nguồn thải điểm là một quá trình có hệ thống, nhằm xác định, thu thập, phân tích và quản lý thông tin về các nguồn thải có vị trí xả thải cụ thể (nhà máy, bệnh viện, trạm xử lý, cơ sở sản xuất…). Kết quả kiểm kê là cơ sở quan trọng để quản lý chất lượng môi trường nước, cấp phép xả thải, lập kế hoạch giảm ô nhiễm và xây dựng chính sách quản lý tài nguyên nước.

Quy trình kiểm kê gồm bốn bước chính: Chuẩn bị kiểm kê, Thu thập thông tin và dữ liệu; Tính toán tải lượng và xử lý số liệu và Quản lý và ứng dụng kết quả kiểm kê.

3.3.1 Chuẩn bị kiểm kê

Mục đích của giai đoạn này là xác định rõ phạm vi và định hướng hoạt động kiểm kê, đảm bảo các bước tiếp theo được triển khai đồng bộ, hiệu quả.

Các nội dung chính:

- Xác định mục tiêu kiểm kê:
    - Đánh giá tổng tải lượng ô nhiễm của khu vực/lưu vực.
    - Giám sát tuân thủ giấy phép xả thải của các cơ sở.
    - Hỗ trợ lập kế hoạch quản lý chất lượng nước.
- Xác định các chất ô nhiễm cần kiểm kê:
    - Chất hữu cơ (BOD, COD), dinh dưỡng (N, P), kim loại nặng, vi sinh vật, vi nhựa, v.v.
    - Lựa chọn dựa trên đặc điểm môi trường và mục tiêu quản lý.
- Xác định loại nguồn thải điểm: Công nghiệp, đô thị, bệnh viện, trạm xử lý nước thải tập trung, cơ sở khai khoáng, v.v.
- Thiết lập ranh giới địa lý kiểm kê: Xác định khu vực/lưu vực sông, đơn vị hành chính, hoặc toàn bộ hệ thống sông.
- Chuẩn bị biểu mẫu và phiếu khảo sát: Thiết kế bộ câu hỏi chuẩn hóa để thu thập thông tin đồng bộ, đầy đủ và chính xác.

3.3.2 Thu thập thông tin và dữ liệu

Thu thập dữ liệu là giai đoạn nền tảng, quyết định độ tin cậy và tính chính xác của toàn bộ quá trình kiểm kê.

Loại thông tin và dữ liệu cần thu thập:

- Danh mục các cơ sở xả thải: danh sách đầy đủ, bao gồm loại hình, quy mô, vị trí.
- Thông tin về từng cơ sở: tên, địa chỉ, loại hình sản xuất, công suất, công nghệ.
- Dữ liệu hoạt động: sản lượng sản xuất, tiêu thụ nguyên liệu, lượng nước sử dụng.
- Hệ số tải lượng ô nhiễm hoặc số liệu tải lượng thực tế: nồng độ và lưu lượng xả thải.
- Dữ liệu không gian và thời gian: tọa độ xả thải, tần suất xả thải, biến động theo mùa.
- Thông tin về chất ô nhiễm và dạng tồn tại: hòa tan, dạng hạt, hoặc tích lũy trong bùn thải.

Phương pháp thu thập dữ liệu:

- Thu thập trực tiếp:

- Khảo sát tại cơ sở: phỏng vấn, kiểm tra hồ sơ, quan sát thực tế.
- Quan trắc trực tiếp: đo đạc lưu lượng, lấy mẫu phân tích chất lượng nước thải.
- Báo cáo vận hành: hồ sơ tự động ghi nhận từ thiết bị giám sát xả thải.

- Thu thập gián tiếp:
  - Báo cáo ĐTM/Đề án bảo vệ môi trường của cơ sở.
  - Dữ liệu thống kê ngành: từ cơ quan quản lý hoặc hiệp hội ngành nghề.
  - Mô hình ước tính xả thải dựa trên công nghệ sản xuất hoặc hệ số phát thải chuẩn.
  - Ước tính tải lượng gián tiếp từ số liệu sản xuất hoặc tiêu thụ nguyên liệu.

3.3.3 Tính toán tải lượng và xử lý số liệu

Sau khi thu thập dữ liệu, cần tính toán tải lượng ô nhiễm và thực hiện kiểm tra, hiệu chỉnh số liệu để đảm bảo chính xác.

- Phương pháp ước tính tải lượng ô nhiễm:
  - Quan trắc trực tiếp: đo lưu lượng và nồng độ tại điểm xả → kết quả chính xác nhất.
  - Sử dụng hệ số tải lượng ô nhiễm: áp dụng các hệ số chuẩn theo loại hình sản xuất.
  - Cân bằng khối lượng: dựa trên nguyên liệu đầu vào, sản phẩm đầu ra, chất thải.
  - Mô hình tính toán: sử dụng mô hình toán học để ước tính khi thiếu số liệu thực tế.
- Kiểm tra và cập nhật dữ liệu:
  - Kiểm tra chéo dữ liệu: so sánh từ nhiều nguồn khác nhau.
  - So sánh với cơ sở cùng ngành: phát hiện sai lệch hoặc bất thường.
  - Xác định số liệu bất thường: kiểm tra các giá trị vượt chuẩn hoặc không hợp lý.
  - Cập nhật định kỳ: điều chỉnh dữ liệu theo chu kỳ quan trắc hoặc báo cáo.

3.3.4 Quản lý và ứng dụng kết quả kiểm kê

Kết quả kiểm kê không chỉ là dữ liệu mà còn công cụ hỗ trợ quản lý và ra quyết định.

Ứng dụng chính:

- Xây dựng danh mục và bản đồ GIS các nguồn ô nhiễm: trực quan hóa vị trí, loại hình, quy mô nguồn thải.
- Theo dõi xu hướng tải lượng ô nhiễm theo thời gian: đánh giá hiệu quả các biện pháp quản lý.

- Cơ sở lập kế hoạch và chính sách quản lý: bao gồm cấp phép xả thải, phân vùng bảo vệ nguồn nước, hoặc xác định khu vực ưu tiên giảm ô nhiễm.
- Công cụ báo cáo và minh bạch thông tin: phục vụ cộng đồng và các bên liên quan.

3.4 Đánh giá nguồn thải vào môi trường nước

Sau khi tiến hành kiểm kê, số liệu về các nguồn thải đã được thu thập và hệ thống hóa theo loại hình, lưu lượng và thành phần ô nhiễm. Tuy nhiên, để phục vụ công tác quản lý môi trường hiệu quả, cần thực hiện đánh giá nguồn thải nhằm xác định:

- Tỷ trọng đóng góp của từng nguồn vào tổng tải lượng thải.
- Nguồn thải chính (có đóng góp lớn) và nguồn thải thứ yếu.
- Mức độ tiềm ẩn rủi ro, ảnh hưởng đến môi trường nước tiếp nhận.

Việc đánh giá này là cơ sở quan trọng để xác định ưu tiên quản lý, kiểm soát, hoặc đề xuất giải pháp giảm thiểu phù hợp.

Các bước thực hiện đánh giá nguồn thải như sau:

Bước 1: Xử lý và tổng hợp số liệu kiểm kê

- Chuẩn hóa các số liệu về lưu lượng, tải lượng ô nhiễm (kg/ngày, tấn/năm).
- Phân loại nguồn thải theo nhóm: công nghiệp, nông nghiệp, sinh hoạt, y tế, dịch vụ…

Bước 2: Xác định nguồn thải chính, thứ yếu

- Tính toán tỷ lệ đóng góp (%) của từng nguồn/nhóm nguồn đối với tổng tải lượng ô nhiễm (COD, BOD, TSS, N, P…).
- Nguồn thải chính là nguồn thải có tỷ trọng lớn, vượt ngưỡng cho phép hoặc gây tác động rõ rệt đến chất lượng môi trường.
- Nguồn thải thứ yếu là nguồn thải quy mô nhỏ, ít ảnh hưởng hoặc phân tán.

Bước 3: Đánh giá tác động tiềm ẩn

- So sánh tải lượng thải với sức chịu tải của nguồn nước tiếp nhận.
- Xác định những điểm nóng cần ưu tiên quản lý.

Bước 4: Kết luận và đề xuất

- Nêu rõ nguồn thải nào đóng góp chủ yếu.
- Đề xuất giải pháp: kiểm soát, giám sát tăng cường đối với các nguồn lớn.

4 PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU TẢI CỦA MÔI TRƯỜNG NƯỚC MẶT ĐỂ XÁC ĐỊNH HẠN NGẠCH XẢ THẢI VÀO TỪNG ĐOẠN SÔNG

4.1 Khái niệm, ý nghĩa và nguyên tắc tính toán khả năng chịu tải

Sức chịu tải (khả năng chịu tải)

Theo Luật Bảo vệ môi trường 2020: Khả năng chịu tải của môi trường là giới hạn chịu đựng của môi trường đối với các nhân tố tác động để môi trường có thể tự phục hồi.

Sức chịu tải của sông là tải lượng ô nhiễm lớn nhất đưa vào sông, mà nồng độ chất gây ô nhiễm trong nước sông vẫn thỏa mãn quy chuẩn theo các mục tiêu sử dụng nước đã được xác định.

Nói cách khác, sức chịu tải là khả năng tiếp nhận thêm tải lượng ô nhiễm mà vẫn đảm bảo mục tiêu chất lượng nước.

Tầm quan trọng của việc tính toán sức chịu tải

- Cho biết được mức độ ô nhiễm môi trường hiện tại;
- Cho biết được lượng chất ô nhiễm có thể thêm vào nguồn nước (trong trường hợp chất lượng nguồn nước chưa đến giới hạn cho phép);
- Tính được lượng chất ô nhiễm xả thải vào nguồn cần giảm đi để môi trường nước có thể phục hồi.

Ý nghĩa của việc tính toán sức chịu tải

- Đây là công cụ quản lý môi trường nước mặt;
- Làm cơ sở cấp phép xả thải và quy hoạch phát triển kinh tế - xã hội.

Nguyên tắc tính toán sức chịu tải của sông

- Có tính hệ thống, đảm bảo tính tổng thể và liên kết theo toàn bộ lưu vực sông.
- Chia đoạn sông cụ thể để thực hiện tính toán phù hợp với đặc điểm từng khu vực.
- Việc tính toán sức chịu tải của từng đoạn sông phải dựa trên các yếu tố sau:
    - Mức độ biến động của dòng nước;
    - Lưu lượng dòng chảy;
    - Các thông số chất lượng nước tại đoạn sông đó;
    - Lưu lượng và đặc điểm ô nhiễm của các nguồn thải đổ vào đoạn sông tương ứng.

4.2 Phương pháp tính toán sức chịu tải

4.2.1 Các yêu cầu đối với việc tính toán sức chịu tải

Việc tính toán sức chịu tải của sông là một quá trình phức tạp, đòi hỏi phải thực hiện một cách hệ thống và khoa học để đảm bảo kết quả chính xác và có thể ứng dụng trong quản lý môi trường. Các yêu cầu cơ bản bao gồm:

- Xác định ranh giới lưu vực, tiểu lưu vực, đoạn sông phục vụ tính toán:
  - Cần phân định rõ ràng ranh giới lưu vực và tiểu lưu vực, xác định hướng dòng chảy và các khu vực tập trung nguồn thải.
  - Sông phải được chia thành các đoạn cụ thể dựa trên đặc điểm thủy văn, đặc điểm phát triển kinh tế - xã hội, mức độ ô nhiễm và sự phân bố nguồn thải.
  - Việc phân đoạn này giúp đảm bảo tính đại diện và chính xác khi mô hình hóa và đánh giá sức chịu tải.
  - Các công cụ hỗ trợ như hệ thống thông tin địa lý (GIS), dữ liệu bản đồ địa hình và dữ liệu thủy văn – khí tượng nên được sử dụng để xác định ranh giới và phân đoạn một cách khoa học.
- Xác định mục tiêu quản lý chất lượng nước:
  - Cần xác định rõ mục tiêu chất lượng nước cho từng đoạn sông, phù hợp với quy hoạch bảo vệ môi trường, quy hoạch lưu vực sông, và các tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật quốc gia.
  - Mục tiêu này thường dựa trên mục đích sử dụng nguồn nước, chẳng hạn: Cấp nước sinh hoạt; Nuôi trồng thủy sản; Tưới tiêu nông nghiệp; Bảo tồn đa dạng sinh học và cảnh quan sinh thái.
  - Mục tiêu quản lý chất lượng nước là cơ sở để xác định giới hạn tối đa các chất ô nhiễm mà sông có thể tiếp nhận nhưng vẫn duy trì được chức năng sinh thái và phục vụ phát triển bền vững.
- Xác định thông số cần tính toán:
  - Lựa chọn các thông số ô nhiễm đặc trưng cho từng loại nguồn thải và mục tiêu chất lượng nước đã đặt ra.
  - Xác định các thông số thủy văn – thủy lực, như lưu lượng dòng chảy, vận tốc dòng chảy, chiều rộng và độ sâu lòng sông, chế độ thủy triều (nếu có).

4.2.2 Các phương pháp tính toán sức chịu tải

Tính toán sức chịu tải của sông là cơ sở quan trọng để quản lý chất lượng môi trường nước, cấp phép xả thải và lập quy hoạch phát triển kinh tế - xã hội gắn với bảo vệ tài nguyên nước. Hiện nay, có ba nhóm phương pháp chính được áp dụng, tùy thuộc vào điều kiện thực tế của nguồn nước và mức độ phức tạp của hệ thống thủy văn – thủy lực bao gồm: phương pháp trực tiếp, phương pháp gián tiếp và phương pháp mô hình hóa.

a. Phương pháp trực tiếp

Khái niệm:

Phương pháp này tính toán trực tiếp tải lượng ô nhiễm tối đa mà đoạn sông có thể tiếp nhận mà vẫn đảm bảo chất lượng nước đạt mục tiêu đề ra.

Điều kiện áp dụng:

- Áp dụng khi đoạn sông không có nguồn thải trực tiếp xả vào hoặc lượng thải không đáng kể;
- Chất lượng nước đầu vào chủ yếu phụ thuộc vào dòng chảy tự nhiên và khả năng pha loãng.

Nguyên tắc tính toán:

- Dựa trên cân bằng khối lượng giữa nồng độ chất ô nhiễm hiện có trong sông và giới hạn nồng độ cho phép theo quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (QCVN 08:2023/BTNMT hoặc tương đương).
- Tải lượng tối đa được xác định dựa vào lưu lượng dòng chảy, nồng độ hiện tại và mức giới hạn cho phép.

Ưu điểm – Hạn chế:

- Ưu điểm: Phương pháp đơn giản, dễ thực hiện, yêu cầu ít dữ liệu.
- Hạn chế: Chỉ phù hợp với các đoạn sông ít chịu tác động từ hoạt động xả thải và có đặc điểm thủy văn ổn định. Không tính đến quá trình tự làm sạch tự nhiên của sông.

Công thức tính toán:

$$L_{tn} = (L_{td} - L_{nn}) \times F_s$$

Trong đó:

- L_{tn}: khả năng tiếp nhận nước thải, khả năng chịu tải đối với từng thông số ô nhiễm;
- L_{td}: tải lượng tối đa của từng thông số chất lượng nước mặt đối với đoạn sông;
- L_{nn}: tải lượng của từng thông số chất lượng nước hiện có trong nguồn nước của đoạn sông;
- F_s: hệ số an toàn, được xem xét, lựa chọn trong khoảng từ 0,7 đến 0,9 trên cơ sở mức độ đầy đủ, tin cậy, chính xác của các thông tin, số liệu sử dụng để đánh giá.

b. Phương pháp gián tiếp

Khái niệm:

Phương pháp này tính toán sức chịu tải khi đoạn sông có nguồn thải trực tiếp xả vào, bằng cách so sánh tải lượng ô nhiễm hiện có với tải lượng cho phép.

Điều kiện áp dụng:

- Đoạn sông chịu tác động từ nhiều nguồn xả thải tập trung hoặc phân tán như khu công nghiệp, khu đô thị, cơ sở sản xuất, khu dân cư.
- Chất lượng nước bị ảnh hưởng đáng kể bởi hoạt động của con người.

Nguyên tắc tính toán:

- Tính toán dựa trên phương trình cân bằng tải lượng ô nhiễm, kết hợp giữa tải lượng tự nhiên và tải lượng từ các nguồn thải trực tiếp.
- Xác định tải lượng tối đa được phép xả thêm vào sông mà không làm vượt quá giới hạn chất lượng nước đã được xác định cho đoạn sông đó.

Ưu điểm – Hạn chế:

- Ưu điểm: Đánh giá được ảnh hưởng cụ thể của từng nguồn thải; Phù hợp cho công tác cấp phép xả thải và quản lý môi trường ở khu vực đô thị hoặc công nghiệp.
- Hạn chế: Yêu cầu dữ liệu đầu vào đầy đủ, bao gồm lưu lượng và thành phần ô nhiễm của từng nguồn thải; Độ chính xác phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu thu thập.

Công thức tính toán:

$$L_{tn} = (L_{td} - L_{nn} - L_{tt}) \times F_s + NP_{td}$$

Trong đó:

- L_{tn}: khả năng tiếp nhận nước thải, khả năng chịu tải đối với từng thông số ô nhiễm, kg/ngày;
- L_{td}: tải lượng tối đa của từng thông số chất lượng nước mặt đối với đoạn sông;
- L_{nn}: tải lượng của từng thông số chất lượng nước hiện có trong nguồn nước của đoạn sông, kg/ngày;
- L_{tt}: tải lượng thông số ô nhiễm có trong nguồn nước thải, kg/ngày;
- F_s: hệ số an toàn, được xem xét, lựa chọn trong khoảng từ 0,7 đến 0,9 trên cơ sở mức độ đầy đủ, tin cậy, chính xác của các thông tin, số liệu sử dụng để đánh giá
- NP_{td}: tải lượng cực đại của thông số ô nhiễm mất đi do các quá trình biến đổi xảy ra trong đoạn sông, kg/ngày. Giá trị NP_{td} phụ thuộc vào từng chất ô nhiễm và có thể chọn giá trị bằng 0 đối với chất ô nhiễm có phản ứng làm giảm chất ô nhiễm này.

Công thức tính toán dựa trên phương trình cân bằng vật chất:

$$D_p + L_{diff} + L_B - N_P = L_y - L_{y0}$$

Trong đó:

- D_p: tổng tải lượng chất ô nhiễm của các nguồn điểm xả vào đoạn sông (kg/ngày);
- L_{diff}: tổng tải lượng chất ô nhiễm của các nguồn diện xả vào đoạn sông (kg/ngày);
- L_B: tải lượng nền tự nhiên của chất ô nhiễm đi vào đoạn sông (kg/ngày);
- N_P: tải lượng của chất ô nhiễm mất đi do các quá trình biến đổi xảy ra trong đoạn sông (kg/ngày);
- L_y, L_{y0}: tải lượng chất ô nhiễm tại các mặt cắt tương ứng ở hạ lưu và thượng lưu của đoạn sông (kg/ngày).

c. Phương pháp mô hình

Phương pháp này mô phỏng các quá trình vật lý, hóa học và sinh học diễn ra trong sông để đánh giá khả năng tự làm sạch của nguồn nước và từ đó xác định tải lượng ô nhiễm tối đa mà sông có thể tiếp nhận.

Quy trình tính toán tải lượng sông bằng mô hình thường được thực hiện qua 5 bước:

Bước 1: Xác định mục tiêu và phạm vi

Cần tính toán tải lượng cho loại chất ô nhiễm nào (BOD, COD, N, P...), trên đoạn sông nào, và mục đích của việc tính toán là gì (đánh giá hiện trạng, dự báo, hay đề xuất giải pháp). Xác định ranh giới khu vực nghiên cứu (lưu vực, đoạn sông, hệ thống kênh rạch) và xác định rõ mục đích của việc tính toán: đánh giá hiện trạng, dự báo tác động từ các dự án phát triển, hay đề xuất phân bổ tải lượng cho các nguồn thải. Từ mục tiêu này, chúng ta sẽ khoanh vùng phạm vi không gian (đoạn sông, toàn bộ lưu vực) và thời gian (mùa khô, mùa mưa) của mô hình. Việc này là nền tảng để thu thập dữ liệu phù hợp. thời gian mô phỏng (mùa khô, mùa mưa, cả năm).

Trước hết, cần xác định rõ mục đích của việc tính toán là gì: đánh giá hiện trạng, dự báo tác động từ các dự án phát triển, hay đề xuất phân bổ tải lượng cho các nguồn thải. Từ mục tiêu này, chúng ta sẽ khoanh vùng phạm vi không gian (đoạn sông, toàn bộ lưu vực) và thời gian (mùa khô, mùa mưa) của mô hình. Việc này là nền tảng để thu thập dữ liệu phù hợp.

Bước 2: Thu thập và xử lý dữ liệu

Để mô hình hoạt động chính xác, cần thu thập một lượng lớn dữ liệu đầu vào, bao gồm:

- Dữ liệu địa hình: bản đồ số độ cao (DEM), các mặt cắt ngang của sông.
- Dữ liệu thủy văn - khí tượng: lưu lượng, mực nước, lượng mưa, nhiệt độ, và tốc độ gió.

- Dữ liệu chất lượng nước: nồng độ ô nhiễm hiện có trong sông (nồng độ nền) và từ các nguồn thải điểm (nhà máy, khu dân cư) hay nguồn phân tán (nông nghiệp).

Sau khi thu thập, dữ liệu phải được kiểm tra, xử lý cẩn thận để loại bỏ sai sót và điền đầy các khoảng trống. Điều này đảm bảo dữ liệu đầu vào sạch và đáng tin cậy.

Bước 3: Xây dựng và hiệu chỉnh, kiểm định mô hình

- Lựa chọn mô hình: Dựa trên mục tiêu và dữ liệu sẵn có, lựa chọn mô hình phù hợp (ví dụ: SWAT cho lưu vực lớn, MIKE 11 cho sông chịu ảnh hưởng triều).
- Xây dựng mô hình: Nhập dữ liệu đã xử lý vào mô hình, xây dựng mạng lưới thủy văn, định vị các nguồn thải và các điểm quan trắc.
- Hiệu chỉnh (Calibration): Chạy mô hình với một bộ dữ liệu quan trắc thực tế và điều chỉnh các thông số của mô hình (như hệ số nhám, hệ số phân hủy chất ô nhiễm) để kết quả mô phỏng khớp với số liệu thực.
- Kiểm định (Validation): Sử dụng một bộ dữ liệu quan trắc độc lập khác để kiểm tra lại độ chính xác của mô hình sau khi hiệu chỉnh.

Bước 4: Mô phỏng các kịch bản và phân tích kết quả

Chạy mô phỏng cho các kịch bản khác nhau, ví dụ:

- Kịch bản hiện trạng: Đánh giá tình hình ô nhiễm hiện tại.
- Kịch bản dự báo: Mô phỏng sự thay đổi nồng độ ô nhiễm khi lưu lượng xả thải hoặc điều kiện thủy văn thay đổi.
- Kịch bản quản lý: Đánh giá hiệu quả của các giải pháp giảm tải lượng (như xây dựng nhà máy xử lý nước thải mới, áp dụng các biện pháp quản lý nông nghiệp).

Phân tích kết quả: Trực quan hóa kết quả (biểu đồ, bản đồ), so sánh các kịch bản và phân tích ảnh hưởng của từng yếu tố đến tải lượng và chất lượng nước.

Dưới đây là một số mô hình phổ biến:

Mô hình SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

Đây là mô hình mô phỏng lưu vực sông, được phát triển bởi Bộ Nông nghiệp Hoa Kỳ. SWAT chuyên tính toán tải lượng từ các nguồn phân tán (diện) như nông nghiệp, đất rừng, đô thị, bằng cách mô phỏng các quá trình thủy văn, xói mòn và vận chuyển chất ô nhiễm trong lưu vực.

- **Phạm vi áp dụng:** Rất phù hợp cho việc đánh giá tải lượng ở các lưu vực có diện tích lớn, bị ảnh hưởng chủ yếu bởi các hoạt động trên đất. Mô hình này giúp đánh giá hiệu quả của các biện pháp quản lý sử dụng đất.
- **Yêu cầu dữ liệu:**
    - Dữ liệu địa lý: Bản đồ số độ cao (DEM), bản đồ sử dụng đất, bản đồ đất.

- Dữ liệu thủy văn - khí tượng: Lượng mưa, nhiệt độ, bức xạ mặt trời, độ ẩm không khí, tốc độ gió.
- Dữ liệu chất lượng nước: Nồng độ ô nhiễm đầu vào.

- **Yêu cầu trình độ:** Người dùng cần có kiến thức vững về thủy văn, quy trình thủy lực và chất lượng nước. Cần có kỹ năng sử dụng phần mềm GIS (Hệ thống thông tin địa lý) để xử lý dữ liệu đầu vào.

Mô hình MIKE 11

MIKE 11 là một bộ công cụ mô phỏng 1 chiều (1D) cho các dòng chảy trong sông, kênh. Nó bao gồm các module riêng biệt cho thủy lực, vận chuyển chất (chất lượng nước) và bùn cát. Module chất lượng nước của MIKE 11 mô phỏng các quá trình hòa tan, phân hủy, lắng đọng của các chất ô nhiễm.

- **Phạm vi áp dụng:** Rất hiệu quả cho các bài toán về thủy lực và chất lượng nước ở các sông, kênh có định tuyến rõ ràng, đặc biệt là ở những vùng chịu ảnh hưởng của thủy triều. Thường được dùng để tính toán khả năng chịu tải của sông, đánh giá tác động của nguồn thải điểm.
- **Yêu cầu dữ liệu:**
  - Dữ liệu thủy văn: Dòng chảy đầu vào, mực nước.
  - Dữ liệu địa hình: Các mặt cắt ngang của sông.
  - Dữ liệu chất lượng nước: Nồng độ ô nhiễm từ các nguồn thải điểm.
- **Yêu cầu trình độ:** Đòi hỏi người dùng có kiến thức sâu về thủy lực sông và chất lượng nước, cũng như kỹ năng thành thạo với phần mềm MIKE 11.

Mô hình WASP (Water Quality Analysis Simulation Program)

WASP là một mô hình chất lượng nước động lực học, được phát triển bởi Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US EPA). Nó mô phỏng sự vận chuyển và biến đổi của các chất ô nhiễm trong môi trường nước (sông, hồ, cửa sông). WASP có thể mô phỏng nhiều chất ô nhiễm cùng lúc (BOD, DO, Nitơ, Phốt pho, tảo...).

- **Phạm vi áp dụng:** Phù hợp cho việc đánh giá chất lượng nước tổng thể, nghiên cứu khả năng tự làm sạch của sông và tác động của các nguồn thải điểm. WASP thường được tích hợp với các mô hình thủy lực khác (như MIKE 11 hoặc HEC-RAS) để có kết quả chính xác hơn.
- **Yêu cầu dữ liệu:**
  - Dữ liệu thủy văn: Dữ liệu đầu vào về dòng chảy và lưu lượng.
  - Dữ liệu chất lượng nước: Nồng độ các chất ô nhiễm và các thông số liên quan (pH, nhiệt độ...) từ các nguồn thải và từ môi trường nước.

- **Yêu cầu trình độ:** Đòi hỏi người dùng có kiến thức chuyên sâu về các quá trình hóa học và sinh học trong môi trường nước. Mặc dù là phần mềm miễn phí, giao diện WASP tương đối phức tạp và yêu cầu người dùng có kinh nghiệm.

Mô hình WEAP (Water Evaluation and Planning)

WEAP là một mô hình tích hợp, tập trung vào việc quản lý và quy hoạch tài nguyên nước. Nó xem xét các vấn đề về cả chất và lượng nước, từ đó giúp đánh giá sự cân bằng giữa cung và cầu nước, cũng như các tác động môi trường. WEAP có thể mô phỏng tải lượng ô nhiễm để giúp các nhà quản lý đưa ra quyết định phân bổ tải lượng hợp lý.

- **Phạm vi áp dụng:** Thường được sử dụng để phân tích các kịch bản quản lý tổng hợp tài nguyên nước ở cấp độ lưu vực hoặc khu vực. WEAP phù hợp để đánh giá tác động của các chính sách, dự án phát triển và biến đổi khí hậu lên nguồn nước.
- **Yêu cầu dữ liệu:**
    - Dữ liệu thủy văn: Lưu lượng, lượng mưa.
    - Dữ liệu kinh tế - xã hội: Nhu cầu sử dụng nước từ các ngành (nông nghiệp, công nghiệp, sinh hoạt).
    - Dữ liệu chất lượng nước: Nồng độ ô nhiễm từ các nguồn.
- **Yêu cầu trình độ:** Yêu cầu người dùng có kiến thức tổng hợp về thủy văn, môi trường và kinh tế. Mô hình có giao diện thân thiện hơn các mô hình kỹ thuật khác, nhưng đòi hỏi sự hiểu biết về mối quan hệ giữa các yếu tố.

d. Phương pháp tính toán đối với hồ và hồ chứa

Nếu vận hành hàng ngày → áp dụng như đánh giá sông. Nếu không vận hành hàng ngày

Công thức tính:

$$M_{tn} = (C_{qc} - C_{nn}) \times V_h \times 10^{-3} \times F_S$$

Trong đó:

- M_{tn}: khả năng tiếp nhận nước thải, khả năng chịu tải đối với từng thông số ô nhiễm của hồ, kg
- C_{qc}: giá trị giới hạn của thông số chất lượng nước mặt theo quy chuẩn kỹ thuật về chất lượng nước mặt ứng với mục đích sử dụng của hồ, mg/l
- C_{nn}: kết quả phân tích thông số chất lượng nước hồ, mg/l
- V_h: dung tích của hồ và được xác định trên cơ sở dung tích của hồ trong mùa cạn, m^3

- F_S: hệ số an toàn, lấy bằng 0,7

e. So sánh khác biệt cốt lõi trong tính toán tải lượng giữa sông và hồ

Trong tính toán tải lượng, sông được xem là một hệ thống vận chuyển. Sự khác biệt cốt lõi nằm ở chỗ mô hình phải chú trọng đến các quá trình thủy động lực học 1 chiều, nơi dòng chảy và vận tốc là yếu tố chủ đạo quyết định khả năng pha loãng, tự làm sạch và vận chuyển chất ô nhiễm theo chiều dài. Ngược lại, hồ được xem là một hệ thống lưu giữ. Mô hình phải chú trọng đến dung tích, độ sâu, và thời gian lưu giữ nước, vì các yếu tố này chi phối các quá trình như lắng đọng, phân tầng nhiệt/mật độ, và tích tụ chất ô nhiễm trong trầm tích. Sự khác biệt này chuyển từ việc mô hình hóa tốc độ di chuyển sang việc mô hình hóa tốc độ lắng đọng và thay đổi nồng độ theo thời gian.

5 NÂNG CAO HIỆU QUẢ XỬ LÝ NƯỚC THẢI SINH HOẠT BẰNG CÔNG NGHỆ TIÊN TIẾN

5.1 Thực trạng hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt Việt Nam hiện nay

5.1.1 Nước thải sinh hoạt – Đặc điểm và tải lượng

Khái niệm

Nước thải sinh hoạt là loại nước thải phát sinh từ hoạt động hàng ngày của con người, bao gồm: ăn uống, nấu nướng; tắm rửa, giặt giũ, vệ sinh cá nhân; vệ sinh nhà cửa, khu dân cư.

Nguồn phát sinh chủ yếu

- Hộ gia đình, chung cư, khu dân cư.
- Trường học, bệnh viện, nhà hàng, khách sạn.
- Các khu vực công cộng như công viên, trung tâm thương mại.

Đặc điểm của nước thải sinh hoạt

- Lưu lượng lớn, phụ thuộc vào mật độ dân cư và mức sống.
- Biến động theo thời gian:
    - Trong ngày: Lưu lượng và mức ô nhiễm tăng cao vào giờ cao điểm (sáng, chiều tối).
    - Theo mùa: Có thể tăng vào mùa hè do nhu cầu tắm rửa, giặt giũ nhiều hơn.
- Thành phần chủ yếu là chất hữu cơ dễ phân hủy sinh học, vi khuẩn gây bệnh, chất rắn lơ lửng (TSS) và các chất dinh dưỡng (Nitơ, Photpho).
- Giá trị điển hình của các thông số ô nhiễm;
    - BOD_5: 200 – 400 mg/L
    - COD: 400 – 800 mg/L
    - TSS: 150 – 450 mg/L
    - Nitơ (N): 30 – 50 mg/L
    - Photpho (P): 5 – 10 mg/L

5.1.2 Quản lý nước thải đô thị tại Việt Nam

Việt Nam đang phải đối mặt với áp lực ngày càng gia tăng về quản lý nước thải đô thị do tốc độ đô thị hóa nhanh và dân số tập trung ngày càng lớn tại các thành phố. Theo số liệu từ Bộ Xây dựng, Cục Phát triển đô thị, đến tháng 12/2021, cả nước có 869 đô thị, chiếm khoảng 40% dân số cả nước. Điều này đồng nghĩa với khối lượng nước thải sinh hoạt khổng lồ phát sinh hàng ngày, đòi hỏi hệ thống thoát nước và xử lý nước thải phải được đầu tư và quản lý hiệu quả hơn.

a. Khối lượng nước thải sinh hoạt ngày càng tăng

Ước tính mỗi ngày, các đô thị trên cả nước phát sinh khoảng 3,8 triệu m^3 nước thải sinh hoạt. Con số này tiếp tục tăng khi dân số đô thị gia tăng, đặc biệt tại các đô thị loại đặc biệt và loại I như Hà Nội, TP.HCM, Huế, Đà Nẵng, Hải Phòng, Cần Thơ.

Trong đó:

- Hà Nội phát sinh khoảng 1,2 triệu m^3/ngày, nhưng mới chỉ có 35% lượng nước thải được thu gom và xử lý.
- TP.HCM phát sinh 2,5 triệu m^3/ngày, nhưng chỉ khoảng 15% được xử lý tại các nhà máy tập trung.

Điều này cho thấy phần lớn nước thải vẫn đang được xả trực tiếp ra môi trường mà chưa qua xử lý đạt chuẩn, gây ô nhiễm nguồn nước, ảnh hưởng sức khỏe cộng đồng và hệ sinh thái.

b. Đặc điểm sử dụng nước và xử lý nước thải tại hộ gia đình

Bên cạnh hệ thống xử lý tập trung, việc xử lý nước thải ngay từ hộ gia đình đóng vai trò quan trọng trong giảm tải cho các nhà máy và bảo vệ môi trường.

- Lượng nước sử dụng bình quân đầu người: khoảng 110 lít/người/ngày, dao động từ 33 – 213 lít/người/ngày tùy thuộc vào đặc điểm khu vực đô thị hay nông thôn.
- Khoảng 90% hộ gia đình hiện có bể tự hoại, chủ yếu dùng để xử lý sơ bộ nước thải đen từ toilet. Tuy nhiên, hiệu quả xử lý chưa cao, do:
    - Bể tự hoại thường chỉ xử lý được một phần chất hữu cơ và vi sinh vật gây bệnh, không xử lý triệt để các chất dinh dưỡng như Nitơ, Phốt pho.
    - 40% bể tự hoại hiện nay không đạt tiêu chuẩn kỹ thuật hoặc đã xuống cấp, dẫn đến rò rỉ và xả thải trực tiếp ra môi trường, gây ô nhiễm nguồn nước ngầm và kênh rạch xung quanh.

c. Hệ thống thoát nước và xử lý còn nhiều hạn chế

Hiện nay, khoảng 70% hộ gia đình tại các đô thị đã có đấu nối vào hệ thống thoát nước đô thị, chủ yếu là hệ thống thoát nước chung (gộp cả nước mưa và nước thải). Tuy nhiên, chỉ 15% tổng lượng nước thải đô thị được thu gom và đưa về các nhà máy xử lý tập trung.

d. Hệ thống nhà máy xử lý nước thải tại Việt Nam

Hiện nay, mạng lưới nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt tại Việt Nam đang từng bước được mở rộng nhưng vẫn chưa đáp ứng đủ nhu cầu xử lý. Đã có 71 nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt đã đi vào hoạt động, với tổng công suất thiết kế khoảng 1,4 triệu m^3/ngày. Ngoài ra, 80 nhà máy khác đang trong giai đoạn đầu tư và xây dựng, dự kiến khi hoàn thành sẽ bổ sung thêm 1,6 triệu m^3/ngày vào tổng công suất xử lý toàn quốc.

Tại Việt Nam, các công nghệ xử lý nước thải đô thị chủ yếu bao gồm các phương pháp sinh học và hóa lý, phù hợp với các điều kiện và nhu cầu xử lý nước thải hiện tại. Các công nghệ phổ biến là:

- Xử lý nước thải bằng phương pháp sinh học: Công nghệ như bể phản ứng theo mẻ (SBR - Sequential Batch Reactor) và Bể phản ứng màng sinh học (MBBR - Moving Bed Biofilm Reactor) đang được áp dụng rộng rãi trong các hệ thống xử lý nước thải đô thị tại Việt Nam. Các công nghệ này giúp xử lý hiệu quả các chất hữu cơ trong nước thải với chi phí vận hành hợp lý, mặc dù đôi khi đòi hỏi đầu tư ban đầu lớn.
- Xử lý bằng công nghệ hóa lý: Các phương pháp như keo tụ, tuyển nổi, lắng được sử dụng để xử lý các chất rắn lơ lửng, cặn bã, kim loại nặng trong nước thải đô thị. Đây là lựa chọn phù hợp cho các khu vực có mức độ ô nhiễm cao và cần xử lý nước thải nhanh chóng.
- Hệ thống xử lý nước thải qua màng lọc: Các hệ thống màng lọc như UF (Ultra-filtration), NF (Nano-filtration) và RO (Reverse Osmosis) cũng được triển khai để xử lý nước thải, đặc biệt là các khu công nghiệp và các khu vực yêu cầu chất lượng nước cao, loại bỏ các kim loại nặng và tạp chất khó phân huỷ.
- Công nghệ xử lý nước thải bằng đất ngập nước nhân tạo: Một số khu vực tại Việt Nam cũng đang thử nghiệm công nghệ xử lý nước thải bằng đất ngập nước nhân tạo. Đây là công nghệ thân thiện với môi trường, giúp xử lý nước thải qua các hệ thống đất ngập nước nhân tạo. Mặc dù chi phí vận hành thấp, nhưng hiệu quả có thể chưa cao trong việc xử lý các chất ô nhiễm phức tạp.

Thống kê các công nghệ xử lý nước thải đô thị tại Việt Nam như Bảng dưới đây:

Bảng 8. Tổng công suất thiết kế và số lượng nhà máy xử lý nước thải đang hoạt động tại Việt Nam được phân loại theo phương pháp xử lý

STT	Phương pháp xử lý	Tổng công suất thiết kế (m^3/ngày)	Số lượng nhà máy XLNT	Công suất thiết kế trung bình (m^3/ngày)	Dao động công suất thiết kế (m^3/ngày)
1	Bể phản ứng theo mẻ (SBR)	606.000	19	32.000	3.500 -200.000
2	Bùn hoạt tính truyền thống (Ỏ)	231.000	7	33.000	4.000-141.000
3	Hồ sinh học	181.000	15	12.000	1.500 - 47.600
4	Mương ô xy hóa (OD)	132.000	7	19.000	4.500 - 40.000

STT	Phương pháp xử lý	Tổng công suất thiết kế (m^3/ngày)	Số lượng nhà máy XLNT	Công suất thiết kế trung bình (m^3/ngày)	Dao động công suất thiết kế (m^3/ngày)
5	A_2O	96.000	6	16.000	2.500 - 41.000
6	Lọc nhỏ giọt (TF)	62.000	6	10.000	2.000 - 32.000
7	Bể phản ứng màng sinh học (MBBR)	20.000	3	7.000	1.200 - 14.200
8	AO	18.000	2	9.000	5.000 -13.180
9	Khác (xử lý cơ học)	13.000	1	13.000	13.000
10	Chưa xác định rõ	25.000	5	5.000	1.200 -15.000
	Tổng	**1.383.000**	**71**	**19.000**	**1.200-200.000**

e. Các hình thức xử lý bùn thải hiện đang được áp dụng

Bùn sinh ra từ các nhà máy xử lý nước thải và từ bể tự hoại hộ gia đình hiện được xử lý bằng nhiều phương thức khác nhau tại Việt Nam, gồm: chôn lấp, làm khô, sản xuất phân compost, phân hủy kỵ khí và đốt, rắn hóa.

- Chôn lấp: Chôn lấp vẫn là phương thức phổ biến cho bùn chưa được xử lý hoặc khi chưa có công nghệ xử lý sâu tại chỗ. Ví dụ, tình trạng bùn từ Nhà máy XLNT Bình Hưng (TP. HCM) từng được thu gom, chứa và vận chuyển đi chôn lấp; báo chí ghi nhận bùn tại đây từng gây mùi và được đưa đi xử lý ở nơi khác.
- Làm khô, ép bùn, sản xuất phân compost: Ví dụ: Nhà máy XLNT Đà Lạt áp dụng hệ thống lắng, ép, sân phơi và tiếp tục xử lý để sản xuất phân vi sinh từ bùn đã ổn định;
- Phân hủy kỵ khí và thu hồi biogas:
    - Trạm/nhà máy Yên Sở (Hà Nội) đã nghiên cứu và áp dụng phân hủy kỵ khí để ổn định bùn và tăng sản lượng khí sinh học;
    - Mô hình ở Đắk Lắk (một số dự án trình diễn) sử dụng bể kỵ khí để đồng phân hủy bùn và chất hữu cơ (ví dụ chất thải thực phẩm), thu biogas và sản xuất điện với quy mô nhỏ (~20 kW).
    - Khu liên hiệp Đa Phước (TP. Hồ Chí Minh) là nơi thu nhận và xử lý bùn, bùn hầm cầu, bùn nạo vét; cơ sở này có các hoạt động xử lý/tiền xử lý bùn.

- Tái sử dụng sản phẩm bùn: Sản xuất phân vi sinh / phân hữu cơ từ bùn đã ổn định hoặc xử lý sơ bộ. Ví dụ tại Đà Lạt, Buôn Mê Thuột, Yên Sở. Sử dụng bùn làm vật liệu xây dựng sau xử lý "làm sạch" từ Yên Sở.
- Rắn hóa bùn thải nguy hại: Khi bùn chứa chất độc (kim loại nặng, thuốc trừ sâu), xử lý thường bao gồm phân tích đặc tính, tách khoanh vùng, rắn hóa.

5.2 Một số công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt tiên tiến

Động lực thay đổi công nghệ xử lý nước thải trên thế giới

Trong nhiều thập kỷ, mục tiêu chính của xử lý nước thải sinh hoạt là loại bỏ các chất hữu cơ và chất rắn lơ lửng để bảo vệ sức khỏe cộng đồng và môi trường nước. Tuy nhiên, bối cảnh toàn cầu hiện nay đang chứng kiến sự chuyển dịch mạnh mẽ từ mô hình "xử lý và xả thải" truyền thống sang mô hình "tái sử dụng và thu hồi tài nguyên". Sự chuyển dịch này được thúc đẩy bởi ba động lực kỹ thuật và môi trường chính.

Thứ nhất, tình trạng khan hiếm nước và áp lực pháp lý về loại bỏ chất dinh dưỡng ngày càng nghiêm ngặt (đặc biệt là nitơ và phốt pho) đang buộc các nhà máy phải đạt được chất lượng nước đầu ra cao hơn. Mục tiêu này không chỉ nhằm ngăn chặn hiện tượng phú dưỡng mà còn đảm bảo nước đã qua xử lý có thể được tái sử dụng an toàn cho các mục đích phi uống được như tưới tiêu hoặc cấp nước công nghiệp.

Thứ hai, đô thị hóa nhanh chóng và giá đất tăng cao đã tạo ra nhu cầu bức thiết về việc giảm diện tích công trình xử lý nước thải. Các công nghệ xử lý sinh học truyền thống cần diện tích lớn cho bể lắng và bể hiếu khí, không còn phù hợp với khu vực đô thị mật độ cao. Điều này đã thúc đẩy sự phát triển của các công nghệ cường độ cao như MBR và AGS.

Thứ ba, nhà máy xử lý nước thải là một trong những cơ sở tiêu thụ điện năng lớn nhất trong thành phố, với quá trình sục khí thường chiếm 50% đến 60% chi phí vận hành. Điều này đã thúc đẩy nghiên cứu và ứng dụng các quy trình xử lý hiệu quả năng lượng, đặc biệt là trong chu trình loại bỏ nitơ, nơi các công nghệ như ANAMMOX có thể giảm đáng kể nhu cầu oxy và hóa chất carbon bên ngoài.

Vai trò của công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt tiên tiến:

- Nâng cao hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm khó phân hủy, vi sinh vật, vi sinh vật gây bệnh, mùi, màu, cũng như các chất dinh dưỡng (nitơ, photpho).
- Giảm chi phí vận hành thông qua tối ưu hóa quá trình, giảm tiêu thụ năng lượng, hóa chất, chi phí bùn thải.
- Tạo điều kiện tái sử dụng nước và thu hồi tài nguyên: tái sử dụng nước sau xử lý để tưới cây, rửa đường, công nghiệp, làm mát; thu hồi dinh dưỡng (nitơ, photpho, struvite…); thu hồi năng lượng từ bùn hoặc khí sinh học.

Các công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt tiên tiến phổ biến

Trên thế giới, nhiều công nghệ mới và tiên tiến đã được phát triển để xử lý nước thải đô thị, đáp ứng yêu cầu bảo vệ môi trường và tối ưu hóa hiệu quả xử lý. Các công nghệ tiên tiến bao gồm:

- Nhóm công nghệ tập trung vào tăng tốc độ phản ứng, giảm diện tích và nâng cao chất lượng nước. VD: MBR (Membrane Bioreactor), AGS (Aerobic Granular Sludge); MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor).
- Nhóm công nghệ tập trung vào giảm năng lượng tiêu thụ và thu hồi dinh dưỡng/năng lượng. VD: ANAMMOX (Anaerobic Ammonium Oxidation), thu hồi Struvite;
- Nhóm công nghệ xử lý bậc cao. VD: Tập trung vào loại bỏ các chất ô nhiễm như dược phẩm, hormone và hóa chất công nghiệp và chất hữu cơ khó phân hủy, VD: AOPs (Advanced Oxidation Processes), Điện hóa; NF (Nanofiltration)
- Nhóm công nghệ bền vững, tập trung vào các giải pháp chi phí thấp, thân thiện với môi trường. VD: CWs (Constructed Wetlands - Đất ngập nước nhân tạo).

5.2.1 MBR - Membrane Bioreactor

Đặc điểm công nghệ

MBR là một công nghệ được ưu tiên lựa chọn hàng đầu hiện nay, công nghệ này là một bước nâng cấp đáng kể so với quá trình xử lý bùn hoạt tính truyền thống. Về bản chất, MBR là sự kết hợp giữa quá trình xử lý sinh học vi sinh (thường là Aerotank) với công nghệ lọc vật lý bằng màng (thường là siêu lọc hoặc vi lọc).

Điểm khác biệt then chốt là MBR loại bỏ hoàn toàn bể lắng thứ cấp sinh học truyền thống. Thay vào đó, module màng MBR, với các lỗ siêu vi lọc, được nhúng trực tiếp vào bể Aerotank hoặc đặt trong một bể riêng biệt. Màng có chức năng phân tách hoàn toàn hỗn hợp nước và bùn, giữ lại toàn bộ chất rắn lơ lửng, vi sinh vật và vi trùng gây bệnh, chỉ cho nước sạch đi qua.

Việc sử dụng màng lọc mang lại một lợi ích sinh học quan trọng: nó cho phép duy trì nồng độ bùn hoạt tính cao hơn đáng kể trong bể phản ứng so với các hệ thống thông thường. Nồng độ sinh khối cao này làm tăng tốc độ phản ứng, rút ngắn thời gian lưu bùn và giảm kích thước tổng thể của công trình.

Hiệu quả xử lý và khả năng mở rộng

Chất lượng nước đầu ra của công nghệ MBR rất cao, thường đạt tiêu chuẩn loại A và có thể đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt cho mục đích tái sử dụng trực tiếp. Nhờ cơ chế lọc vật lý tuyệt đối, hiệu quả loại bỏ TSS và các vi sinh vật gây bệnh gần như tuyệt đối.

Một lợi thế của MBR là tính linh hoạt và khả năng mở rộng. Nếu nhu cầu xử lý tăng lên do việc mở rộng kinh doanh hoặc gia tăng dân số đô thị, người vận hành chỉ cần lắp đặt thêm module màng vào bể hiện có mà không cần phải xây dựng hay mở rộng thêm các bể phản ứng hoặc bể lắng cồng kềnh.

Ứng dụng

MBR là lựa chọn tối ưu cho các dự án tại các khu vực đô thị mật độ cao, khu du lịch, hoặc các khu công nghiệp yêu cầu chất lượng nước thải xả ra hoặc tái sử dụng phải đạt tiêu chuẩn cao nhất. Công nghệ này đã được áp dụng thành công tại Việt Nam (ví dụ: Công ty TNHH Evergreen Hải Dương) và được sử dụng rộng rãi để xử lý nước thải đô thị trên toàn cầu.

Tuy nhiên, việc đạt được hiệu suất lọc tuyệt đối này đi kèm với một sự đánh đổi về mặt chi phí vận hành. Màng lọc dễ bị tắc nghẽn, đòi hỏi năng lượng cho việc nén màng, sục khí dưới màng để làm sạch, và chi phí hóa chất rửa ngược. Mặc dù vậy, khả năng tạo ra nước đạt tiêu chuẩn cao nhất, cho phép tái sử dụng (ví dụ: tưới tiêu, nước làm mát công nghiệp), tạo ra một giá trị kinh tế bù đắp cho chi phí vận hành cao hơn này, làm cho MBR trở thành lựa chọn ưu tiên ở các khu vực khan hiếm nước.

5.2.2 AGS - Aerobic Granular Sludge

Đặc điểm công nghệ

Công nghệ AGS là một sự đổi mới đột phá nhằm tăng cường hiệu suất của các hệ thống bùn hoạt tính theo mẻ (SBR). Thay vì sử dụng bùn keo lơ lửng, AGS tạo ra các hạt bùn sinh học dày đặc, có cấu trúc lớp, tương tự như các hạt sỏi nhỏ.

Cấu trúc hạt nhỏ gọn của AGS cho phép hệt thống duy trì nồng độ sinh khối cao hơn đáng kể so với hệ thống thông thường, thường vượt quá 10 g/L. Nồng độ sinh khối cao này cho phép hệ thống xử lý tải trọng hữu cơ và dinh dưỡng cao hơn trên một đơn vị thể tích, làm tăng hiệu quả của quá trình xử lý.

Hiệu quả xử lý

AGS mang lại khả năng xử lý đa chức năng, đồng thời loại bỏ BOD, Nitơ và Phốt pho. Các lợi ích kỹ thuật chính bao gồm:

Hiệu suất lắng cao: Hạt bùn dày đặc có tốc độ lắng cao hơn đáng kể. Các kết quả thí nghiệm cho thấy tốc độ lắng đã tăng 40%, trong khi chỉ số thể tích bùn (SVI), một chỉ số đo lường khả năng lắng, đã giảm 20%. Điều này cải thiện đáng kể khả năng phân tách bùn-nước, một vấn đề tồn tại trong các hệ thống SBR và bùn hoạt tính truyền thống.

Loại bỏ phốt pho (P) tốt: Hiệu suất loại bỏ phốt pho sinh học (Bio-P) được tăng cường đáng kể. Trong một nghiên cứu điển hình, nồng độ phốt pho hòa tan trong nước thải đầu ra đã giảm tới 50%, đạt mức 1.6 mg/L.

AGS giải quyết hai nhược điểm chính của hệ thống bùn hoạt tính truyền thống là lắng kém và yêu cầu diện tích lớn. Bùn hạt lớn, dày đặc cho phép nồng độ sinh khối cao, đồng thời quá trình sinh học hiệu quả cao giúp giảm thiểu kích thước công trình. AGS là một giải pháp lý tưởng cho việc nâng cấp nhà máy hiện hữu hoặc xây dựng công trình mới trên quỹ đất hạn chế, mang lại hiệu suất loại bỏ dinh dưỡng khắt khe với chi phí vốn thấp hơn so với việc triển khai công nghệ MBR.

Ứng dụng

AGS được ứng dụng rộng rãi để xử lý cả nước thải đô thị và nước thải công nghiệp có tải lượng cao.

5.2.3 MBBR - Moving Bed Biofilm Reactor

Đặc điểm công nghệ

Công nghệ MBBR dựa trên nguyên lý phân giải sinh học, trong đó vi sinh vật phát triển trên giá thể di động (màng sinh học) để phân hủy chất ô nhiễm. Giá thể thường làm từ nhựa PE, nhẹ và có diện tích bề mặt lớn (500 – 1200 m^2/m^3), đảm bảo lơ lửng trong bể nhờ sục khí hoặc khuấy trộn cơ học. Quá trình sục khí vừa cung cấp oxy cho vi sinh vật, vừa duy trì chuyển động, tăng khả năng tiếp xúc giữa màng sinh học và nước thải.

Mật độ vi sinh vật trên giá thể cao hơn nhiều so với công nghệ bùn hoạt tính truyền thống (CAS), giúp tăng tải trọng và hiệu suất xử lý. Một điểm nổi bật của MBBR là khả năng hình thành các môi trường vi mô:

- Lớp ngoài của màng sinh học: giàu oxy, diễn ra oxy hóa chất hữu cơ và Nitrat hóa.
- Lớp trong của màng sinh học: thiếu oxy hoặc kỵ khí, thích hợp cho khử Nitrat.

Nhờ đó, MBBR loại bỏ đồng thời nitơ tổng mà không cần bể thiếu khí riêng biệt. Hệ vi sinh này cũng bền vững, ít bị rửa trôi, giúp hệ thống ổn định trước các biến động tải hoặc pH. Tỷ lệ giá thể so với thể tích bể thường từ 25% – 50% (20% đã đạt hiệu quả cao).

MBBR giảm diện tích xây dựng 30% – 50% so với CAS nhờ mật độ vi sinh vật cao và không cần bể tuần hoàn bùn. Bùn dư cũng ít hơn đáng kể, giảm chi phí xử lý. Đây là giải pháp tối ưu để nâng cấp nhà máy CAS quá tải mà không cần mở rộng mặt bằng.

So với MBR, MBBR có chi phí đầu tư và vận hành thấp hơn, không cần vệ sinh màng hay nhân công kỹ thuật cao. Tuy nhiên, chất lượng nước đầu ra của MBBR chỉ đạt chuẩn xả thải hoặc tưới tiêu, trong khi MBR loại bỏ gần như hoàn toàn chất rắn lơ lửng và vi sinh vật, thích hợp cho tái sử dụng trực tiếp.

Ứng dụng

MBBR là giải pháp số một khi muốn nâng cấp và mở rộng công suất. Khả năng tích hợp giá thể vào các bể Aerotank hiện có mà không cần xây dựng mới giúp tăng công suất xử lý một cách nhanh chóng và tiết kiệm diện tích.

MBBR đơn lẻ kết hợp với bể lắng hiệu suất cao hoặc lọc tinh là giải pháp kinh tế nhất. Chất lượng nước đầu ra đảm bảo đạt chuẩn môi trường cho phép xả thải hoặc tái sử dụng cho mục đích tưới tiêu.

Trong các trường hợp cần đạt chất lượng nước siêu sạch nhưng vẫn muốn tối ưu hóa chi phí vận hành, các hệ thống lai ghép đang trở nên phổ biến. Bằng cách kết hợp MBBR và MBR (MBBR-MBR), các nhà vận hành có thể tận dụng sự ổn định sinh học của MBBR để xử lý tải lượng hữu cơ, từ đó giảm tải cho màng MBR, kéo dài tuổi thọ màng và giảm tần suất vệ sinh.

5.2.4 ANAMMOX - Anaerobic Ammonium Oxidation

Cơ chế sinh học

ANAMMOX là một trong những phát minh quan trọng nhất trong lĩnh vực xử lý nitơ. Đây là quá trình sinh học trong đó vi khuẩn Anammox chuyển hóa Amoni (NH_3) và Nitrit (NO_2^-) trực tiếp thành khí Nitơ (N_2) trong điều kiện yếm khí.

Phản ứng cốt lõi có thể được biểu diễn như sau:

$$NH_3 + 1.32NO_2^- + H^+ \rightarrow 1.02N_2 + 0.26NO_3^- + 2H_2O$$

Quá trình ANAMMOX tạo ra hiệu quả kinh tế lớn vì nó không cần sử dụng nguồn carbon hữu cơ bên ngoài (như Methanol) và tiêu thụ ít oxy hơn đáng kể so với quá trình Nitrat hóa/Khử Nitrat đầy đủ. Quá trình chỉ cần oxy cho bước Nitrit hóa một phần (để tạo ra NO_2^- từ NH_4^+), giúp giảm chi phí sục khí - nguồn tiêu thụ năng lượng lớn nhất trong nhà máy xử lý nước thải.

Thách thức kỹ thuật

Vi khuẩn Anammox là vi khuẩn phát triển chậm và rất nhạy cảm với nồng độ oxy hòa tan (DO). Vi khuẩn này bị ức chế nếu nồng độ DO vượt quá 0.01 mg/L. Do đó, việc khởi động và nuôi cấy sinh khối Anammox đòi hỏi thời gian dài và kỹ thuật kiểm soát chặt chẽ. Các nghiên cứu cho thấy, quá trình làm giàu sinh khối có thể mất khoảng 80 ngày để hình thành vùng bùn hạt trong lò phản ứng tuần hoàn nội bộ (IC Reactor).

Ứng dụng

ANAMMOX chủ yếu được ứng dụng để xử lý dòng nước thải có nồng độ Amoni cao và carbon hữu cơ thấp, chẳng hạn như nước rỉ rác từ bãi chôn lấp, hoặc nước quay lại từ quá trình khử nước bùn trong các nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt quy mô lớn. Việc tích hợp ANAMMOX vào xử lý dòng quay lại là một chiến lược quan trọng giúp nhà máy đạt được mục tiêu Net Zero Energy bằng cách giảm chi phí vận hành sục khí.

5.2.5 Thu hồi Struvite

Cơ chế hoạt động

Nước thải, đặc biệt là nước thải có nguồn gốc từ chăn nuôi hoặc bùn đã tiêu hóa kỵ khí, là một nguồn tài nguyên quý giá, cung cấp các chất dinh dưỡng thiết yếu như NPK (Nitơ, Phốt pho, Kali). Việc thu hồi các chất này là một phần quan trọng của kinh tế tuần hoàn.

Công nghệ thu hồi Struvite tập trung vào việc loại bỏ Amoni và Photphat bằng phương pháp kết tủa hóa học, tạo ra tinh thể Struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), còn được gọi là magie amoni photphat (MAP).

Lợi ích kinh tế và môi trường

Việc thu hồi Struvite mang lại lợi ích kép là giảm ô nhiễm và thu hồi tài nguyên:

- Công nghệ này giúp loại bỏ các chất dinh dưỡng NPK mà các công nghệ sinh học kỵ khí (như Biogas) truyền thống không thể xử lý triệt để, ngăn chặn hiện tượng phú dưỡng khi nước thải xả ra môi trường.
- Struvite là một loại phân bón chậm tan chất lượng cao, có thể thay thế một phần cho các mỏ Photphat tự nhiên đang dần cạn kiệt, phù hợp với xu hướng phát triển bền vững.

ANAMMOX và Struvite là hai công nghệ bổ sung cho nhau trong quản lý dinh dưỡng tại các nhà máy xử lý đô thị hiện đại. Struvite tập trung thu hồi phốt pho và một phần nitơ từ các dòng tải trọng cao, tạo ra sản phẩm thương mại. Ngược lại, ANAMMOX tập trung loại bỏ nitơ còn lại một cách tiết kiệm năng lượng nhất.

5.2.6 AOPs - Advanced Oxidation Processes

Đặc điểm công nghệ

AOPs là tập hợp các kỹ thuật xử lý nước thải dựa trên việc tạo ra các gốc hydroxyl (·OH) có tính oxy hóa cực mạnh. Gốc hydroxyl có tiềm năng oxy hóa cao thứ hai sau Fluorine, cho phép nó phân hủy triệt để hầu hết các chất hữu cơ.

Các phương pháp AOPs phổ biến bao gồm Ozonation, UV/H_2O_2, Fenton, và các phương pháp điện hóa. Tất cả đều có chung mục đích là tạo ra gốc hydroxyl để oxy hóa mạnh mẽ, nhanh chóng và triệt để các chất ô nhiễm.

Ứng dụng

AOPs là công cụ không thể thiếu để phân hủy các chất hữu cơ khó phân hủy, thuốc nhuộm, dược phẩm, thuốc trừ sâu, và các chất ô nhiễm nguy hại khác mà quá trình sinh học thông thường không thể xử lý được.

Trong bối cảnh tái sử dụng nước, đặc biệt là hướng tới tái sử dụng trực tiếp, AOPs đóng vai trò then chốt trong việc loại bỏ các mối đe dọa sức khỏe cộng đồng như dược

phẩm và hóa chất độc hại. Tuy nhiên, việc triển khai AOPs thường đòi hỏi chi phí vốn và chi phí vận hành cao do tiêu thụ hóa chất và điện năng.

5.2.7 Điện hóa (Electrochemical Treatment)

Cơ chế xử lý

Công nghệ điện hóa là một phương pháp hóa - lý kết hợp, được sử dụng để xử lý các loại nước thải công nghiệp và sinh hoạt có chứa chất hữu cơ khó phân hủy và màu sắc. Phương pháp điện hóa kết hợp nhiều cơ chế xử lý đồng thời, diễn ra qua ba giai đoạn chính :

- Keo tụ điện hóa (Electrocoagulation): Sử dụng điện cực hòa tan để tạo ra chất keo tụ tại chỗ, loại bỏ chất rắn lơ lửng và chất keo.
- Oxy hóa điện hóa (Electrooxidation): Tạo ra các chất oxy hóa mạnh (bao gồm cả gốc hydroxyl) trên bề mặt điện cực để phân hủy chất hữu cơ.
- Tuyển nổi điện hóa (Electroflotation): Sử dụng các bọt khí cực nhỏ (H_2,O_2) tạo ra từ điện phân để nâng các chất rắn và dầu mỡ lên bề mặt.

Ứng dụng

Công nghệ điện hóa có triển vọng lớn trong xử lý nước thải sinh hoạt và công nghiệp, đặc biệt hiệu quả đối với nước thải có màu sắc và các thành phần không dễ phân hủy sinh học, như nước thải từ ngành dệt may, nhà máy giấy. Nhờ cơ chế đa năng, công nghệ này có khả năng loại bỏ triệt để nhiều loại chất ô nhiễm khác nhau.

5.2.8 NF – Nanofiltration

Đặc điểm công nghệ

Màng lọc nano có khả năng giữ lại các vật liệu có kích thước nano, đồng thời loại bỏ các ion hóa trị hai và hóa trị cao một cách hiệu quả. Để đạt được hiệu suất lọc cao, màng Nano đòi hỏi áp suất vận hành cao hơn so với màng UF (Ultrafiltration – Siêu lọc) /MF (Microfiltration – Vi lọc). Do đó, NF tiêu thụ điện năng nhiều hơn để bơm và nén, tạo ra áp suất cần thiết. Ưu điểm của công nghệ này là:

- Có khả năng loại bỏ các chất ô nhiễm như thuốc diệt cỏ, thuốc trừ sâu còn sót lại, chất hữu cơ tự nhiên, muối, và nitrat
- Có thể được sử dụng để làm mềm nước (loại bỏ ion hóa trị hai gây độ cứng).
- Cho chất lượng nước đầu ra tốt và ổn định, ít sử dụng hóa chất và chi phí quản lý/bảo trì thấp.

Mặc dù có nhiều ưu điểm song công nghệ này còn một số hạn chế như:

- Có giá thành cao và đắt tiền hơn so với màng RO (Reverse Osmosis – Thẩm thấu ngược)

- Cần áp suất cao, dẫn đến tiêu thụ điện năng lớn
- Màng Nano rất nhạy cảm với Clo. Nếu nước đầu vào (đã qua khử trùng bằng Clo) có hàm lượng Clo cao, màng có thể bị hỏng.

Ứng dụng

NF là một công nghệ tiên tiến, cần thiết cho mục đích tái sử dụng nước đòi hỏi chất lượng siêu cao (như nước cấp cho công nghiệp hoặc tái tạo nước uống), nhưng nó là công đoạn bổ sung sau xử lý sinh học.

5.2.9 CWs - Constructed Wetlands

Đặc điểm công nghệ

Công nghệ CWs là một phương pháp xử lý nước thải dựa trên tự nhiên, mô phỏng các vùng đất ngập nước, nơi hệ sinh thái thực vật thủy sinh, vi sinh vật và đất/vật liệu lọc phối hợp hoạt động để lọc và làm sạch nước thải. Cơ chế xử lý rất đa dạng, bao gồm:

- Lắng và hấp phụ: Loại bỏ chất rắn lơ lửng và hấp phụ các chất hóa lý. Khả năng loại bỏ chất rắn lơ lửng của các hệ thống ngập nước là cực cao.
- Phân hủy sinh học: Vi sinh vật bám vào rễ cây đảm nhiệm việc loại bỏ chất hữu cơ hòa tan. Cây trồng như sậy, cỏ nến (Typha) , chuối hoa (Canna) đóng vai trò quan trọng trong việc vận chuyển oxy từ không khí xuống rễ để duy trì điều kiện hiếu khí cho vi sinh vật.
- Hấp thụ thực vật: Các cây trồng như cỏ nến và cây chuối hoa có khả năng xử lý tốt nước thải giàu Nitơ và Phốt pho, đồng thời hấp thụ các kim loại nặng như Asen.

Hiệu quả xử lý và tính bền vững

CWs là một hệ thống thân thiện với môi trường, bền vững, và có chi phí vận hành và bảo trì thấp do hoạt động chủ yếu dựa vào năng lượng mặt trời.

Về hiệu suất, một nghiên cứu về hệ thống dòng chảy thẳng đứng (Vertical Flow CWs) cho thấy hiệu suất xử lý TSS, BOD_5 và COD đạt lần lượt 75%, 67.5% và 73% ở lô thí nghiệm có trồng sậy.

Đặc biệt, CWs có hiệu quả khử trùng vượt trội. Kết quả xử lý Fecal Coliform đạt hiệu quả trên 99.99%. Điều này rất quan trọng khi nước đã qua xử lý được tái sử dụng cho mục đích tưới tiêu nông nghiệp, đảm bảo an toàn về mặt vi sinh.

Mặc dù CWs cần diện tích đất lớn, hạn chế lớn nhất đối với các khu vực đô thị, nhưng đây lại là giải pháp tối ưu ở nông thôn hoặc các khu du lịch sinh thái, nơi đất đai dồi dào và cần một hệ thống hòa hợp với cảnh quan.

Tổng hợp các phương pháp xử lý nước thải tiên tiến nhằm mục đích đạt yêu cầu chất lượng phù hợp cho các ứng dụng khác nhau được trình bày ở Bảng 9 sau đây.

Bảng 9. Một số công nghệ xử lý nước thải tiên tiến

Công nghệ	Loại nước thải phù hợp	Mục tiêu tái sử dụng	Quốc gia đang áp dụng	Ghi chú
MBR	Nước thải sinh hoạt, đô thị, công nghiệp nhẹ	Tái sử dụng cho tưới tiêu, rửa đường, cấp nước kỹ thuật	Nhật Bản, Đức, Ấn Độ, Trung Quốc	Chất lượng nước đầu ra cao, thích hợp cho đô thị
MBBR	Nước thải sinh hoạt và công nghiệp có tải lượng hữu cơ cao	Tái sử dụng trong công nghiệp (làm mát, tưới cây)	Ấn Độ, Việt Nam	Dễ vận hành, thích ứng tốt với biến động tải
AOPs	Nước thải y tế, công nghiệp (hóa chất, thuốc trừ sâu)	Tái sử dụng có kiểm soát hoặc xả ra môi trường	Mỹ, Đức, Nhật Bản, Trung Quốc	Loại bỏ chất hữu cơ khó phân hủy
NF	Nước thải công nghiệp, tái sử dụng yêu cầu chất lượng nước cao	Cấp nước kỹ thuật, bổ sung nước sạch	Mỹ, Hàn Quốc	Có thể thay thế RO trong một số ứng dụng
NEWater (MF/UF+ RO+UV)	Nước thải sinh hoạt đã xử lý sơ cấp	Tái sử dụng cho công nghiệp, tưới, bổ sung nguồn nước sinh hoạt	Singapore	NEWater là tên thương mại của hệ thống tích hợp nhiều công nghệ
CWs	Nước thải sinh hoạt quy mô nhỏ	Tưới tiêu, trồng cây cảnh	Thái Lan, Việt Nam	Chi phí thấp, hiệu quả xử lý hữu cơ ổn định

Để lựa chọn được công nghệ xử lý nước thải tiên tiến phù hợp với điều kiện của Việt Nam, cần tiến hành so sánh toàn diện giữa các nhóm công nghệ dựa trên các tiêu chí chính: công năng, hiệu quả chi phí, hiệu suất xử lý và tính bền vững trong dài hạn. Việc phân tích này không chỉ giúp xác định mức độ phù hợp về mặt kỹ thuật mà còn làm rõ tính khả thi về tài chính và khả năng duy trì vận hành trong điều kiện thực tế tại các đô thị. Bảng dưới đây tổng hợp và so sánh các công nghệ trên dựa vào các tiêu chí chính, nhằm hỗ trợ cho việc lựa chọn công nghệ phù hợp với điều kiện cụ thể của Việt Nam.

Bảng 10. So sánh hiệu quả chi phí, hiệu suất xử lý và tính bền vững của các công nghệ xử lý nước thải tiên tiến

Công nghệ	**Tiềm năng tái sử dụng**	**Hiệu quả chi phí** (CAPEX + OPEX)	**Hiệu suất xử lý** (BOD, SS, TN, TP)	**Tính bền vững** (năng lượng, vận hành, phát thải)
SBR	Trung bình – nước đạt loại B, có thể dùng tưới cây, rửa đường	Chi phí đầu tư và vận hành tương đối thấp	BOD > 90%, SS > 90%, N ~ 60–80%	Tốt, dễ vận hành, phù hợp quy mô nhỏ – trung
MBBR	Trung bình – thích hợp cho đô thị vừa và nhỏ, tái sử dụng tưới tiêu	Vận hành đơn giản, tiết kiệm năng lượng	BOD > 85%, SS > 85%, N ~ 60–75%	Tốt, thích nghi cao, dễ nâng cấp
MBR	Rất cao – nước đạt chuẩn A, dùng cho đô thị, công nghiệp, tái sử dụng cao cấp	Chi phí cao, tốn năng lượng lọc màng	BOD, SS, Coliform ~ 99%, N ~ 80–90%	Khá bền vững nếu có bảo trì tốt, cần điện năng cao
Điện keo tụ (EC)	Cao – loại bỏ màu, vi sinh, ion, phù hợp nước thải công nghiệp	Tùy loại nước, chi phí điện cao nếu không tối ưu	BOD > 85%, kim loại nặng, màu ~ 90–95%	Trung bình – phát sinh bùn, tiêu thụ điện
NF	Rất cao – loại bỏ chất hòa tan, ion, dùng cho ăn uống, nồi hơi, tái sử dụng đặc biệt	CAPEX & OPEX cao, cần tiền xử lý tốt	Loại bỏ 90–99% ion, vi sinh, chất hữu cơ	Không bền nếu thiếu bảo trì, phát sinh nước thải thứ cấp
RO	Rất cao – dùng cho ăn uống, công nghiệp điện tử, tái sử dụng chất lượng cao	Chi phí rất cao, đòi hỏi tiền xử lý và áp lực cao	Loại bỏ gần như hoàn toàn vi sinh, ion, muối	Không bền nếu không duy trì tốt, phát sinh nước thải thứ cấp
Ozone + UV (khử trùng)	Rất cao – xử lý giai đoạn cuối để đạt nước cấp cao	Chi phí cao, không xử lý chất rắn	Diệt > 99% vi sinh, oxi hóa chất hữu cơ khó phân hủy	Sạch, không phát thải phụ, nhưng tiêu thụ điện lớn
CW	Trung bình – dùng cho tái sử dụng tưới cây, cảnh quan, phù hợp nông thôn	Chi phí thấp, thân thiện môi trường	BOD ~ 70–85%, N, P phụ thuộc vào loại thực vật & thiết kế	Rất bền vững, hấp thụ CO_2, không phát sinh hóa chất
UASB cải tiến	Trung bình – phù hợp xử lý nước thải giàu hữu cơ, sinh khí biogas	Rất tiết kiệm năng lượng, đầu tư ban đầu thấp	BOD ~ 70–85%, SS thấp nếu không kèm xử lý bổ sung	Rất bền vững, sinh năng lượng, phát thải thấp

5.3 Giải pháp công nghệ thông minh và số hóa trong vận hành hệ thống xử lý nước thải

Việc ứng dụng công nghệ số và hệ thống điều khiển thông minh giúp vận hành hiệu quả hơn và giảm thiểu sai sót. Các công nghệ nổi bật gồm:

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):

SCADA là một hệ thống điều khiển tự động hiện đại, đóng vai trò trung tâm trong việc giám sát, thu thập và xử lý dữ liệu thời gian thực trong các nhà máy xử lý nước thải. Đây là công cụ không thể thiếu trong xu hướng số hóa ngành hạ tầng môi trường, giúp nâng cao hiệu quả vận hành, giảm thiểu lỗi thủ công và tối ưu hóa chi phí. SCADA bao gồm ba thành phần chính:

- Hệ thống điều khiển giám sát trung tâm (supervisory system) – là nơi điều hành toàn bộ hệ thống và phân tích dữ liệu;
- Thiết bị đầu cuối từ xa (RTU – Remote Terminal Unit) và PLC (Programmable Logic Controller) – thiết bị kết nối các cảm biến, thiết bị đo để thu thập, xử lý thông tin trong thời gian thực và đưa ra quyết định điều khiển tức thì cho các quy trình của hệ thống công nghệ;
- Giao diện người – máy (HMI – Human Machine Interface) – tiếp nhận và hiển thị dữ liệu một cách trực quan giúp người vận hành dễ dàng theo dõi và tương tác.

Trong ứng dụng xử lý nước thải, SCADA thực hiện các chức năng chính như:

- Giám sát và điều khiển tự động các thiết bị như bơm, van, máy khuấy, máy thổi khí, tủ điện,… giúp duy trì hoạt động ổn định, liên tục của nhà máy;
- Thu thập, lưu trữ và phân tích dữ liệu vận hành: SCADA ghi nhận liên tục các chỉ số quan trọng như pH, DO, COD, lưu lượng, mức nước, áp suất,… và hiển thị dưới dạng biểu đồ, báo cáo theo thời gian thực hoặc lịch sử;
- Cảnh báo và xử lý sự cố: hệ thống tự động đưa ra cảnh báo khi các thông số vượt ngưỡng hoặc có sự cố xảy ra (như mất điện, rò rỉ, tràn bể, thiết bị hỏng), đồng thời có thể kích hoạt quy trình phản ứng khẩn cấp;
- Tối ưu hóa quá trình vận hành: thông qua việc phân tích dữ liệu lịch sử và xu hướng, SCADA giúp điều chỉnh quy trình vận hành phù hợp, giảm tiêu hao năng lượng, hóa chất và tăng hiệu quả xử lý.

Với khả năng vận hành 24/7 và khả năng tích hợp với các công nghệ khác như IoT, AI, điện toán đám mây, hệ thống SCADA góp phần quan trọng trong việc hiện đại hóa ngành xử lý nước thải, đặc biệt tại các đô thị, khu công nghiệp, nơi yêu cầu vận hành chính xác, an toàn và liên tục.

Giám sát từ xa (Remote Monitoring):

Trong bối cảnh số hóa ngành hạ tầng và nhu cầu nâng cao hiệu quả vận hành, giám sát từ xa (Remote Monitoring) trở thành một trong những giải pháp công nghệ quan trọng giúp các nhà máy xử lý nước thải tăng cường khả năng kiểm soát và phản ứng linh hoạt mà không cần sự hiện diện vật lý liên tục của nhân sự kỹ thuật tại hiện trường.

Thông qua việc tích hợp các thiết bị đo lường – cảm biến – điều khiển vào hệ thống, dữ liệu về các thông số vận hành (lưu lượng, mức nước, áp lực, tốc độ bơm, nhiệt độ, pH, COD, DO, ORP, các chỉ tiêu chất lượng nước khác) được truyền tự động và liên tục lên nền tảng đám mây hoặc phần mềm điều khiển chuyên dụng. Các nền tảng này có thể được kết nối với máy tính trung tâm (back-end), máy tính, điện thoại, máy tính bảng (front-end), cho phép kỹ sư vận hành và nhà quản lý theo dõi hệ thống mọi lúc, mọi nơi thông qua mạng Internet.

Việc giám sát từ xa không chỉ hỗ trợ việc phát hiện sớm các sự cố kỹ thuật (như tắc nghẽn, rò rỉ, sụt áp, hoặc nồng độ ô nhiễm vượt ngưỡng), mà còn cho phép thực hiện các điều chỉnh vận hành từ xa như thay đổi tốc độ bơm, điều chỉnh liều lượng hóa chất, kích hoạt chế độ xử lý dự phòng… Điều này đặc biệt có ý nghĩa trong điều kiện nhân lực kỹ thuật hạn chế, hoặc khi hệ thống xử lý nằm ở khu vực khó tiếp cận.

Ngoài ra, việc giám sát từ xa giúp tối ưu công tác bảo trì – bảo dưỡng, bằng cách cung cấp thông tin liên tục về trạng thái thiết bị, thời gian hoạt động, lịch sử lỗi, từ đó cho phép xây dựng kế hoạch bảo trì chủ động và giảm thiểu thời gian ngừng hệ thống không mong muốn.

Tổng thể, giải pháp giám sát từ xa góp phần:

- Giảm thiểu chi phí nhân lực và thời gian vận hành;
- Nâng cao khả năng phản ứng kịp thời với sự cố;
- Tăng cường độ tin cậy và hiệu quả của hệ thống;
- Hỗ trợ vận hành liên tục 24/7, kể cả ngoài giờ làm việc.

Trong thời đại chuyển đổi số và xu hướng đô thị thông minh, công nghệ giám sát từ xa là thành tố không thể thiếu trong việc hiện đại hóa ngành xử lý nước thải và hướng tới vận hành bền vững, linh hoạt, tiết kiệm chi phí.

IoT (Internet of Things)

IoT đang ngày càng khẳng định vai trò quan trọng trong quản lý và vận hành hạ tầng đô thị thông minh, trong đó có lĩnh vực xử lý nước thải. Việc ứng dụng IoT cho phép thiết lập một hệ thống giám sát và điều khiển tự động, hoạt động theo thời gian thực, góp phần nâng cao hiệu quả xử lý, giảm thiểu rủi ro và tối ưu chi phí vận hành.

Cụ thể, trong hệ thống xử lý nước thải, các thiết bị cảm biến IoT được bố trí tại các điểm quan trọng trong toàn bộ chu trình – từ đầu vào, các bể xử lý, cho đến đầu ra

– nhằm thu thập liên tục các thông số vận hành như: pH, nhiệt độ, độ dẫn điện, DO, COD, BOD, lưu lượng dòng chảy, áp suất bơm, và nhiều chỉ số môi trường khác. Các cảm biến này có khả năng truyền dữ liệu theo thời gian thực về trung tâm điều hành hoặc hệ thống quản lý dữ liệu đám mây, giúp bộ phận kỹ thuật nắm bắt nhanh chóng mọi biến động trong quá trình xử lý.

Dữ liệu được thu thập sẽ được phân tích thông qua phần mềm điều khiển tích hợp hoặc trí tuệ nhân tạo, từ đó đưa ra các cảnh báo sớm nếu có sự cố hoặc sai lệch bất thường trong vận hành – ví dụ như nồng độ COD vượt ngưỡng, pH dao động bất thường, lưu lượng đầu vào tăng đột ngột, v.v. Nhờ đó, hệ thống có thể tự động điều chỉnh liều lượng hóa chất, tốc độ bơm, chế độ sục khí, hoặc thậm chí chuyển sang quy trình xử lý dự phòng để đảm bảo ổn định chất lượng nước đầu ra.

Bên cạnh đó, các thiết bị IoT còn cho phép giám sát từ xa qua nền tảng số, giúp các nhà quản lý hoặc kỹ thuật viên có thể điều hành, giám sát và xử lý sự cố mọi lúc, mọi nơi – đặc biệt hữu ích trong các hệ thống xử lý phân tán hoặc vùng nông thôn, nơi thiếu nhân lực kỹ thuật trực tiếp. Hệ thống IoT cũng hỗ trợ lưu trữ lịch sử vận hành và cung cấp dữ liệu cho công tác bảo trì dự báo, từ đó giảm thiểu thời gian ngừng máy và kéo dài tuổi thọ thiết bị.

Tóm lại, việc tích hợp công nghệ IoT trong vận hành nhà máy xử lý nước thải không chỉ giúp tăng mức độ tự động hóa và số hóa, mà còn mở ra khả năng xây dựng các hệ thống xử lý nước thải thông minh, đáp ứng tốt các yêu cầu về bảo vệ môi trường trong điều kiện nguồn lực hạn chế như ở Việt Nam.

AI (Artificial Intelligence - Trí tuệ nhân tạo)

Trong những năm gần đây, AI đã nổi lên như một công nghệ then chốt trong cuộc cách mạng công nghiệp, mang đến những đổi mới đột phá trong nhiều lĩnh vực, bao gồm cả quản lý và xử lý nước thải. AI hoạt động dựa trên các thuật toán học máy (machine learning), học sâu (deep learning) và phân tích dữ liệu lớn (big data analytics), cho phép trích xuất thông tin có giá trị từ một lượng dữ liệu vận hành khổng lồ và phức tạp của hệ thống xử lý nước thải.

Trong lĩnh vực xử lý nước thải, AI có thể được tích hợp vào hệ thống điều hành để thực hiện một loạt chức năng nâng cao như:

- Dự đoán tải lượng nước thải và biến động chất lượng đầu vào, từ đó hỗ trợ lập kế hoạch vận hành và phân bổ tài nguyên một cách hợp lý;
- Phát hiện sớm các bất thường hoặc sự cố kỹ thuật, ví dụ như thay đổi đột ngột về pH, nhiệt độ, COD, hay sự cố trong hệ thống bơm và xử lý;
- Tối ưu hóa các tham số vận hành như tốc độ bơm, lưu lượng khí sục, liều lượng hóa chất, thời gian chu trình, nhằm đảm bảo hiệu suất xử lý ổn định và tiết kiệm năng lượng;

- Đưa ra các mô hình dự báo và kịch bản vận hành, giúp nhà quản lý có thêm căn cứ để ra quyết định nhanh chóng và chính xác.

Một trong những lợi thế nổi bật của AI là khả năng học và thích nghi với điều kiện vận hành thực tế, không phụ thuộc vào các mô hình lý thuyết cố định. Khả năng này đặc biệt hữu ích trong môi trường nước thải đô thị – nơi đặc điểm dòng thải thường biến động theo thời gian và chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố bên ngoài như thời tiết, mùa vụ, hoạt động dân cư và công nghiệp.

Hơn nữa, khi được tích hợp cùng với các hệ thống cảm biến IoT và nền tảng giám sát từ xa, AI tạo ra một hệ sinh thái điều khiển – dự báo – phản hồi tự động, giúp nâng cao mức độ tự động hóa của hệ thống xử lý nước thải lên một tầm cao mới. Mối quan hệ hiệp đồng giữa AI và IoT cho phép không chỉ thu thập dữ liệu (IoT) mà còn phân tích – hiểu – ra quyết định (AI), từ đó tạo ra một chu trình vận hành thông minh, tiết kiệm và bền vững hơn.

Tóm lại, ứng dụng AI trong ngành nước thải không chỉ giúp cải thiện hiệu quả xử lý, tiết kiệm chi phí vận hành, mà còn góp phần nâng cao khả năng thích ứng và phản ứng linh hoạt trước các thách thức môi trường đô thị ngày càng phức tạp.

Blockchain

Blockchain – công nghệ chuỗi khối – có tiềm năng ứng dụng cao trong quản lý và giám sát dữ liệu vận hành hệ thống xử lý nước thải, đặc biệt trong các dự án công – tư (PPP - Public - Private Partnership), hoặc khi cần minh bạch thông tin với nhiều bên liên quan. Với đặc điểm nổi bật là tính bất biến, bảo mật và phân quyền, blockchain cho phép ghi nhận các dữ liệu như thông số nước đầu ra, lịch sử bảo trì thiết bị, lượng nước tái sử dụng ,... một cách không thể chỉnh sửa. Điều này giúp tăng cường tính tin cậy trong quản lý môi trường, hỗ trợ công tác thanh kiểm tra và nâng cao hiệu quả giám sát từ cơ quan chức năng.

Cảm biến thông minh thế hệ mới

Các cảm biến sử dụng công nghệ nano, vật liệu tiên tiến hoặc tích hợp AI, đang dần thay thế cảm biến truyền thống nhờ độ nhạy cao, khả năng tự hiệu chuẩn và tiêu thụ năng lượng thấp. Chúng có thể phát hiện nhanh và chính xác các chất ô nhiễm vi lượng như kim loại nặng, dược phẩm tồn dư, vi sinh vật nguy hiểm, … mà các thiết bị thông thường khó phát hiện. Việc triển khai loại cảm biến này trong các trạm xử lý nước thải giúp nâng cao độ chính xác trong giám sát, đồng thời tối ưu quy trình xử lý theo thời gian thực, đảm bảo chất lượng nước đầu ra ổn định hơn.

Digital Twin

Digital Twin là mô hình số hóa ảo của một hệ thống vật lý thực, cho phép mô phỏng toàn bộ quy trình xử lý nước thải trong môi trường kỹ thuật số. Công nghệ này hỗ trợ phân tích hiệu suất, dự đoán tình huống phát sinh và thử nghiệm các phương án

vận hành mà không cần can thiệp vào hệ thống thực tế. Từ đó giúp tăng tốc độ thử nghiệm, tối ưu thiết kế công trình cũng như chiến lược vận hành và giúp giảm thiểu rủi ro. Digital Twin đang được ứng dụng trong các đô thị thông minh và nhà máy xử lý nước tiên tiến ở nhiều nước phát triển.

Big Data & Phân tích dữ liệu:

Khi hệ thống xử lý nước thải tích hợp ngày càng nhiều cảm biến, thiết bị giám sát và nền tảng vận hành (như SCADA, IoT), lượng dữ liệu tạo ra mỗi ngày là rất lớn.

Việc ứng dụng Big Data và các công cụ phân tích tiên tiến cho phép tổng hợp, xử lý và khai thác dữ liệu vận hành giúp việc vận hành trở nên chủ động, thông minh và tiết kiệm chi phí hơn so với mô hình truyền thống, thông qua các chức năng:

- Dự báo tải lượng nước thải theo mùa hoặc theo giờ;
- Đánh giá hiệu suất hoạt động của từng thiết bị, từ đó đề xuất kế hoạch bảo trì tối ưu;
- Phát hiện sớm bất thường hoặc cảnh bảo nguy cơ như rò rỉ, tắc nghẽn, tràn bể...

Bảng dưới đây tổng hợp những tiềm năng ứng dụng của các công nghệ thông minh phổ biến và công nghệ dẫn dắt xu thế trong xử lý nước thải.

Bảng 11. Ứng dụng tiềm năng của các công nghệ thông minh phổ biến và công nghệ dẫn dắt xu thế trong xử lý nước thải

Nhóm công nghệ	Công nghệ đại diện	Ứng dụng cụ thể
AI	Machine Learning, Deep Learning	Dự báo tải lượng, tự động điều chỉnh vận hành, phát hiện bất thường
IoT	Cảm biến kết nối mạng, Gateway truyền dữ liệu	Giám sát thông số nước thải theo thời gian thực, cảnh báo sự cố
Giám sát từ xa	Hệ thống Cloud, phần mềm dashboard	Quản lý hệ thống từ xa, tiết kiệm chi phí nhân lực và thời gian phản hồi
SCADA & PLC	Siemens, Schneider Electric, Honeywell, ...	Tự động hóa quy trình vận hành, điều khiển thiết bị hiệu quả
Blockchain	Hyperledger, Ethereum...	Đảm bảo tính minh bạch và an toàn trong quản lý dữ liệu vận hành hệ thống
Digital Twin	ANSYS, Siemens Twins Builder, ...	Mô phỏng ảo để tối ưu hóa thiết kế, vận hành thử nghiệm
Big Data	Nền tảng phân tích dữ liệu (Hadoop, Azure, AWS, ...)	Phân tích dữ liệu vận hành, hỗ trợ ra quyết định và tối ưu bảo trì
Cảm biến thông minh thế hệ mới	Sensor tích hợp công nghệ nano hoặc AI	Phát hiện chính xác chất ô nhiễm, nâng cao chất lượng kiểm soát

5.4 Xu hướng thu hồi tài nguyên từ xử lý nước thải sinh hoạt

- Tái sử dụng nước: dùng nước sau xử lý cho tưới cây, rửa đường, vệ sinh, làm mát công nghiệp; trong một số trường hợp tái sử dụng cho sinh hoạt nếu đạt chuẩn.
- Thu hồi dinh dưỡng: Nitơ & Photpho có thể được thu hồi để làm phân bón, ví dụ kết tủa struvite, vivianite. Nghiên cứu chỉ ra công nghệ kết tủa struvite có thể thu hồi >80-90 % photpho từ nước thải.
- Thu hồi năng lượng & vật liệu: Khí sinh học từ quá trình phân hủy kị khí hoặc xử lý bùn; Bùn xử lý có thể chuyển thành phân compost hoặc vật liệu xây dựng sau xử lý ổn định.

a. Saemul Park, mô hình xử lý nước thải tiên tiến tại Hàn Quốc

Thông tin chung về Saemul Park

- Tên chính thức: Nhà máy xử lý nước thải Saemul Park (còn gọi là Nhà máy xử lý nước thải Bakdal, thành phố Anyang-si, tỉnh Gyeonggi, Hàn Quốc)
- Đặc điểm nổi bật: Nhà máy xử lý nước thải năng lượng tự chủ với khả năng phục hồi nước, năng lượng và tài nguyên khác từ nước thải.
- Thiết kế: Được xây dưới lòng đất để giảm tác động khói, mùi, ồn; mặt đất phía trên được tận dụng như công viên và không gian công cộng.

Hình 1. Nhà máy xử lý nước thải Bakdal, Hàn Quốc

Các tính năng công nghệ và phục hồi tài nguyên

- Phục hồi năng lượng và chất thải hữu cơ
  - Sử dụng quá trình co-digestion (tiêu hóa kết hợp) giữa bùn nước thải và chất thải thực phẩm để sinh biogas.
  - Có sử dụng hệ thống CambiTHP (Thermal Hydrolysis Process) để tiền xử lý bùn thải và chất thải thực phẩm để tăng khả năng sinh methan, giảm mùi, diệt khuẩn và tạo sản phẩm có hàm lượng chất khô cao.
  - Khả năng sản xuất điện từ biogas và sử dụng nhiệt sinh ra để hỗ trợ quy trình xử lý (sưởi ấm, xử lý nhiệt, v.v.)

Quy mô hệ thống

- Công suất xử lý: nhà máy mới có thể xử lý khoảng 250.000 tấn nước thải mỗi ngày.
- Số dân phục vụ: Khoảng 600.000 người ở Anyang.
- Công suất thiết bị CambiTHP: khoảng 84 tấn khô mỗi ngày tính trên lượng bùn, cùng với lượng chất hữu cơ thực phẩm xử lý khoảng 27.000 tấn/năm (65% là bùn nước thải + 35% là chất thải thực phẩm)

b. Blue Plains (Mỹ), nhà máy xử lý nước thải tiên tiến nhất thế giới

Blue Plains nằm ở Washington D.C., Hoa Kỳ, không chỉ là nhà máy xử lý nước thải tiên tiến lớn nhất thế giới mà còn là một hình mẫu toàn cầu về quản lý chất lượng nước và phục hồi tài nguyên. Nhà máy đóng vai trò then chốt trong việc bảo vệ môi trường sông Potomac và Vịnh Chesapeake, vốn là những lưu vực có quy định xả thải rất nghiêm ngặt.

Để đáp ứng các giới hạn xả thải cực kỳ thấp, Blue Plains đã vượt xa các quy trình xử lý bậc hai tiêu chuẩn bằng cách áp dụng một chuỗi các công nghệ tiên tiến như:

- Nhà máy đã đi tiên phong trong việc sử dụng quy trình loại bỏ nitơ sinh học (BNR - Biological Nutrient Removal) trên quy mô lớn để giảm tải lượng nitơ xuống mức 4 mg/L và phốt pho xuống ngưỡng công nghệ.
- Nước thải sau xử lý sinh học được đưa qua hệ thống lọc đa phương tiện (Multimedia Filtration), cơ sở lọc nước thải lớn nhất thế giới. Quá trình này giúp loại bỏ triệt để các hạt rắn lơ lửng và phốt pho còn sót lại.
- Nước thải được khử trùng bằng clo hóa, sau đó clo dư được loại bỏ hoàn toàn trước khi xả ra sông Potomac.

Hình 2. Nhà máy xử lý nước thải Blue Plains, Mỹ

Điểm nổi bật nhất của Blue Plains là cách tiếp cận "Tài nguyên từ chất thải", biến bùn thải thành năng lượng và sản phẩm có giá trị:

- Nhà máy vận hành hệ thống thủy phân nhiệt CambiTHP lớn nhất thế giới. Quá trình này sử dụng nhiệt độ và áp suất cao để "nấu" bùn thải trước khi đưa vào bể phân hủy kỵ khí.
- Công nghệ thủy phân nhiệt làm tăng đáng kể khả năng phân hủy của bùn, từ đó tăng sản lượng khí biogas. Khí biogas này được sử dụng để chạy các thiết bị đồng phát, tạo ra 10 MW điện năng, đáp ứng khoảng 25% nhu cầu điện cho toàn bộ nhà máy.
- Bùn thải sau khi phân hủy kỵ khí được xử lý và nâng cấp thành biosolids (phân bón sinh học) giàu dinh dưỡng, an toàn, được ứng dụng rộng rãi trong nông nghiệp và phục hồi đất đai.

Với công suất thiết kế lên tới 384 triệu gallon mỗi ngày, Blue Plains có khả năng xử lý lượng nước thải khổng lồ, phục vụ hơn 1.6 triệu cư dân tại thủ đô Washington D.C. và các khu vực đô thị lân cận thuộc Maryland và Virginia. Đặc biệt, nhà máy còn sở hữu khả năng chống chịu vượt trội trước các điều kiện thời tiết cực đoan. Trong các trận mưa lớn, nhờ vào hệ thống xử lý dòng chảy ướt (wet weather flow) tiên tiến, Blue Plains có

thể xử lý dòng chảy cực đại vượt 1 tỷ gallon mỗi ngày, đảm bảo rằng ngay cả trong những thời điểm áp lực cao nhất, nước thải vẫn được xử lý an toàn trước khi xả ra môi trường.

c. Strass (Áo), nhà máy xử lý nước thải tự chủ năng lượng đầu tiên trên thế giới

Nhà máy xử lý nước thải Strass nằm ở Zillertal, Áo, được công nhận là nhà máy xử lý nước thải đầu tiên trên thế giới đạt mức tự chủ năng lượng hoàn toàn. Nhà máy này không chỉ đơn thuần là xử lý nước thải mà còn là một nhà máy điện nhỏ, sản xuất ra nhiều năng lượng điện hơn mức cần thiết cho toàn bộ hoạt động của mình.

Nhà máy phục vụ một khu vực du lịch năng động, có tải lượng xử lý thay đổi lớn, tương đương với 60.000 dân vào mùa hè và lên tới 250.000 dân vào mùa cao điểm du lịch mùa đông. Điều này đòi hỏi một hệ thống xử lý linh hoạt và hiệu quả cao.

Hình 3. Nhà máy xử lý nước thải Strass, Áo

Để đạt được mục tiêu kép là chất lượng nước xả thải cao và tự chủ năng lượng, Strass đã áp dụng và phát triển nhiều công nghệ đột phá:

Xử lý nước thải hai giai đoạn và tối ưu hóa Biogas

Strass sử dụng quy trình bùn hoạt tính hai giai đoạn. Giai đoạn A được thiết kế để thu giữ nhanh chóng 55-65% chất hữu cơ thông qua hấp phụ sinh học với thời gian lưu bùn rất ngắn. Nhờ đó, chất hữu cơ được chuyển trực tiếp vào bùn thải, tránh bị phân hủy hiếu khí và tiết kiệm đáng kể oxy/điện năng cho sục khí. Bùn giàu chất hữu cơ này sau đó được đưa thẳng đến các bể phân hủy kỵ khí, làm tăng sản lượng khí biogas—nguồn nhiên liệu dồi dào cho hệ thống đồng phát điện.

Sau khi phần lớn chất hữu cơ được loại bỏ ở giai đoạn A, nước tiếp tục chảy sang giai đoạn B. Giai đoạn này tập trung vào việc loại bỏ triệt để chất hữu cơ còn lại và thực hiện quy trình khử nitơ chuyên sâu. Với tải lượng thấp hơn, Giai đoạn B có thể hoạt động hiệu quả để đạt được nồng độ nitơ thấp nhất, đáp ứng các tiêu chuẩn xả thải nghiêm ngặt trước khi nước được thải ra môi trường.

Công nghệ DEMON® loại bỏ nitơ

Strass là nhà máy đầu tiên trên thế giới áp dụng thành công và thương mại hóa quy trình DEMON® để xử lý dòng nước quay lại giàu amoniac. Công nghệ này sử dụng vi khuẩn Anammox để chuyển hóa Nitơ amoniac trực tiếp thành khí nitơ (N_2). Phương pháp này giúp giảm tới 60% năng lượng cần thiết cho sục khí (so với phương pháp truyền thống) và không cần dùng đến chất hữu cơ (carbon) bổ sung.

Không chỉ dừng lại ở việc xử lý nước thải hiệu quả, Strass còn là hình mẫu về khả năng mở rộng công suất mà không cần xây dựng thêm. Nhờ áp dụng quy trình Triple-A (Alternating Activated Adsorption), nhà máy đã tăng công suất lên 50% chỉ bằng cách tối ưu hóa các bể chứa và cơ sở hạ tầng hiện có, giúp tiết kiệm chi phí xây dựng.

Tự chủ năng lượng

Điểm mạnh lớn nhất của Strass là khả năng tự cung tự cấp năng lượng. Nhà máy sử dụng khí biogas để vận hành các động cơ đồng phát, tạo ra điện năng và nhiệt năng. Nhờ việc tự chủ hoàn toàn năng lượng, Strass đã giảm đáng kể chi phí vận hành.

6 DANH SÁCH TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng Việt

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2011). Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải công nghiệp (QCVN 40:2011/BTNMT).
2. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2015). Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước ngầm (QCVN 09:2015/BTNMT).
3. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2019). Quyết định số 1460/TCMT ngày 12/11/2019 về việc ban hành Sổ tay Hướng dẫn tính toán và công bố Chỉ số Chất lượng nước (VN-WQI).
4. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2023). Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (QCVN 08-MT:2023/BTNMT).
5. Bộ Nông nghiệp và Môi trường. (2025). Dự thảo hướng dẫn đánh giá khả năng chịu tải của môi trường nước mặt đối với sông, hồ.
6. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2025). Thông tư 05/2025/TT-BTNMT: Hướng dẫn kỹ thuật chi tiết về quản lý nước thải sinh hoạt và nước thải đô thị.
7. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2025). Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải sinh hoạt và đô thị (QCVN 14:2025/BTNMT).
8. Bộ Y tế. (2024). Thông tư 52/2024/TT-BYT: Quy định các nội dung kiểm tra, giám sát chất lượng nước sạch sinh hoạt.
9. Chính phủ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2022). Nghị định 08/2022/NĐ-CP: Quy định chi tiết một số điều của Luật Bảo vệ môi trường. Hà Nội, Việt Nam: Chính phủ.
10. Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2017). Luật Thủy lợi (Luật số 08/2017/QH14).
11. Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2020). Luật Bảo vệ môi trường (Luật số 72/2020/QH14).
12. Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2023). Luật Tài nguyên nước (Luật số 28/2023/QH15).

Tài liệu tiếng Anh

13. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP). (1994). Environmental monitoring (definition).
14. World Health Organization (WHO). (n.d.). Definition of environmental pollution.