

Krzysztof Kasprzak
Przedsiębiorstwo Zagraniczne MULTIREAKTOR PL
Oddział w Poznaniu

Biologiczne oczyszczanie ścieków

1. Wstęp

Ścieki to woda zanieczyszczona w wyniku działalności gospodarczej i sanitarnej domieszkami mineralnymi i organicznymi, które mogą występować w formie zawiesin, koloidów i związków rozpuszczalnych. Substancje te są szkodliwe dla zdrowia lub nadają wodzie niekorzystne cechy organoleptyczne (zapach, wygląd). Oczyszczanie ścieków polega na częściowym lub całkowitym usunięciu tych niepożądanych dodatków i na częściowym ich zmineralizowaniu. Ze względu na zakres i sposób usuwania zanieczyszczeń ze ścieków rozróżnia się cztery podstawowe stopnie oczyszczania:

I^o – usunięcie odpadów pływających i łatwo opadających zawiesin, obniżenie koncentracji związków biogennych (azot, fosfor) o 5–15%;

II^o – usunięcie 90–96% zawiesin i 95–98% rozpuszczonych związków organicznych (mineralizacja), zmniejszenie koncentracji związków biogennych o 30–50%;

III^o – usunięcie większości (>96%) związków biogennych;

IV^o – usunięcie prawie wszystkich związków rozpuszczonych i bakterii, umożliwienie wtórnego wykorzystania wody odzyskanej ze ścieków (np. dla potrzeb przemysłu).

Podstawowe znaczenie w II oczyszczania mają tlenowe i beztlenowe procesy biologiczne, natomiast w III^o stosuje się różne procesy biologiczne i fizyko-chemiczne. Koszty eksploatacji oczyszczalni o III^o oczyszczania ścieków są jednak o 30–45% większe w porównaniu z oczyszczalnią o II^o oczyszczania. Oczyszczanie I^o i II^o może być realizowane w warunkach sztucznych lub naturalnych, gdzie w sposób zorganizowany wykorzystuje się zdolność środowiska wodnego i glebowego do samooczyszczania przy określonej ograniczonej uciążliwości dla środowiska. Nakłady energetyczne są w tym przypadku znacznie mniejsze niż przy oczyszczaniu w warunkach sztucznych.

2. Dopytywanie związków biogennych do wód powierzchniowych

Dopytywanie mineralnych związków pokarmowych do wód powierzchniowych prowadzi do nadmiernej produkcji materii organicznej, jej akumulacji i rozkładu. Wzrost koncentracji tych związków, czego przejawem jest masowy rozwój glonów, w wodach powierzchniowych narusza stabilizację ekosystemów wodnych. Wyraża się ona głównie w zdolności do odtwarzania cyklicznych (w każdym sezonie) sukcesji zbiorowisk glonów. Zaczyna się ona na wiosnę rozwojem *Bacillariophyceae*, następnie rozwojem *Chlorophyta* w lecie i ponownym rozwojem *Bacillariophyceae* jesienią. Znaczne wzbogacenie środowiska wodnego w mineralne związki pokarmowe pro-

wadzi do uproszczenia składu gatunkowego zbiorowisk glonów na korzyść kilku zaledwie gatunków, a zarazem do zmniejszenia stabilności ekosystemu wodnego (1). Szczególnie istotny jest wpływ związków fosforu, ponieważ wysokie koncentracje tego pierwiastka stymulują w odbiornikach ścieków (głównie ekosystemach wodnych) rozwój *Cyanophyta*, które mogą szybko podwyższyć ewentualne niskie (obniżone w procesie oczyszczania) stężenia związków azotowych przez wiązanie wolnego azotu z atmosfery (2). Orientacyjnie przyjmuje się, że z 10^3 g dostarczonego do zbiornika wodnego fosforu może powstać około 10^5 g suchej biomasy, czyli około 10^6 g mokrej biomasy glonów (2). W zlewniach, gdzie występują osiedla ludzkie, ścieki bytowe (sanitarne) są najczęściej głównym źródłem fosforu dla wód, a produkcja związków biogenych w postaci fekalii ludzkich oraz środków do prania i mycia stanowi jedno z najpoważniejszych źródeł eutrofizacji. Ocenia się, że ilości fosforu produkowane rocznie przez jednego mieszkańca mogą dochodzić do kilku kg ($0,1-3,6 \text{ kg} \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$; $0,3-9,9 \text{ g} \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{doba}^{-1}$), natomiast ilości azotu do kilkunastu, rzadziej kilkudziesięciu kg (2,3,4). Fosfor pochodzący z detergentów stanowi 50-75% całej zawartości fosforu w ściekach. Stężenia związków biogenych w samych ściekach komunalnych, gdzie bardzo często występuje także znaczna domieszka ścieków przemysłowych, są na ogół duże i sięgają średnio do kilkudziesięciu mg azotu ($13-100 \text{ mg} \cdot \text{N} \cdot \text{dm}^{-3}$) i średnio od kilku do kilkunastu mg fosforu ($0,8-66 \text{ mg} \text{ P} \cdot \text{dm}^{-3}$) w dm^3 .

3. Metody biologicznego oczyszczania ścieków

W biotechnologiach oczyszczania ścieków przeważają procesy biologiczne związane z rozkładem ściekowej materii organicznej przez mikroorganizmy. Poprzez wykorzystanie aktywności mikroorganizmów zawartych w ściekach nieoczyszczonych (surowych) możliwe jest usuwanie zanieczyszczeń łatwo ulegających biodegradacji. Do usunięcia dużej części polarnych hydrofilowych substancji zawartych w ściekach wykorzystuje się także procesy biosorpcji i biokoagulacji. Należy zwrócić uwagę, że wybór metody biologicznego oczyszczania ścieków i związanych z tą metodą konkretnych technicznych rozwiązań wynika z kompromisu między chęcią uzyskania możliwie jak największego efektu oczyszczania, czyli znacznego usunięcia zanieczyszczeń, małego przyrostu biomasy i w rezultacie zapobiegania eutrofizacji odbiornika oraz minimalizacji kosztów. W całości procesów biologicznego oczyszczania ścieków wykorzystuje się populacje mikroorganizmów o szczególnie wysokiej aktywności metabolicznej, wzmożonej dodatkowo przez zachodzące ciągle procesy mutacji poszczególnych gatunków mikroorganizmów i mechanizmy genetycznej adaptacji. Procesy te są szczególnie intensywne w populacjach mikroorganizmów, kiedy w ich środowisku (ściekach) występują czynniki mutagenne, zwiększające częstotliwość pojawiania się mutantów. Powstaje tym samym możliwość korzystnej, pod względem przebiegu procesów biologicznych w oczyszczanych ściekach, selekcji mutantów. Znaczenie genetycznej adaptacji mikroorganizmów w technologiach biologicznego oczyszczania ścieków dlatego jest tak duże, gdyż do czynników mutagennych należy bardzo wiele związków chemicznych powszechnie występujących w znacznych niekiedy stężeniach w ściekach. W przypadku biologicznych procesów oczyszczania, w których uczestniczą populacje mikroorganizmów o zróżnicowanym czasie generacji dąży się do oddzielnego prowadzenia fazy procesu zachodzącej przy udziale mikroorganizmów o długim okresie generacji. Szczególną rolę w tych pro-

cesach odgrywają bakterie aerobowe, a podstawowym zjawiskiem w procesie tlenowego oczyszczania ścieków jest rozpuszczanie tlenu w cieczy. W oczyszczalniach ścieków proces oczyszczania przebiega sprawnie tylko wtedy, gdy ilość dostarczonego tlenu jest wystarczająca dla swobodnego rozwoju mikroorganizmów osadu czynnego. Niedobór, a także nadmiar tlenu rozpuszczonego prowadzą do rozwoju niepożądanych gatunków mikroorganizmów, które po zdominowaniu ilościowym innych gatunków w niekorzystny sposób wpływają na charakter przebiegu oczyszczania. Dostarczanie tlenu do podtrzymywania i intensyfikowania tlenowych procesów oczyszczania ścieków jest jednak bardzo kosztowne. W dotychczas wykonywanych i eksploatowanych rozwiązaniach oczyszczalni opartych na metodzie osadu czynnego, napowietrzanie pochłania aż 50–70% całych kosztów eksploatacji oczyszczalni. Należy jednak podkreślić, że właściwego oczyszczania ścieków nie należy wiązać wyłącznie z działalnością mikroorganizmów. Duże znaczenie mają tutaj także procesy adsorpcji wywołane przez śluzowate kłaczkę i błony otaczające komórki bakteryjne. Procesy te uległyby szybkiemu zahamowaniu, gdyby adsorbowane związki nie były ciągle przyswajane przez bakterie.

Bakterie anaerobowe i procesy beztlenowe są rzadko wykorzystywane do oczyszczania ścieków. Mają one natomiast duże znaczenie w przerabianiu osadów ściekowych, np. w wydzielonych komorach fermentacji (WKF).

Biologiczne oczyszczanie ścieków prowadzić można przy zastosowaniu różnych metod naturalnych i sztucznych w środowisku glebowym oraz wodnym (wody powierzchniowe). Biotechnologia oczyszczania ścieków doczekała się niezwykle bogatej literatury naukowo-technicznej, omawiającej różne możliwości zastosowania określonej metody. Najważniejsze z nich to:

Stawy utleniające. Stosując kaskady systemu stawów o różnego typu biocenozach (stawy: bakteryjne, glonowy, skorupiakowy) uzyskuje się bardzo wysoki stopień oczyszczania ze związków organicznych i biogenów zawartych w ściekach komunalnych. Dzięki dużej zdolności samoregulacji w stawach utleniających oczyszczać można także ścieki przemysłowe, zawierające m.in. związki toksyczne (fenole, kreozole, aldehydy). Redukcja BZT₅ może dochodzić w lecie do około 90–95% w odpływie z trzeciego stawu; zimą spada do około 30–50%. W celu zwiększenia efektywności oczyszczania stosuje się np. napowietrzanie lub zawracanie odpływu ścieków do ponownego oczyszczania. Najpełniejsze oczyszczanie otrzymuje się w systemie stawów, gdzie biocenozy są w pełni rozwinięte we wszystkich ogniwach troficznych. Stawy można także zarybiać, uzyskując wyższą redukcję związków biogennych. Redukcja azotu amonowego może dochodzić do 93%, azotanów do 60%, a fosforanów do 68%. Stawy utleniające są także zdolne do redukcji bakterii i wirusów chorobotwórczych. Zbiorniki te charakteryzują się bogatą makro- i mikrofauną oraz mikroflorą (*Protozoa*, zwłaszcza *Ciliata*, bezbarwne *Flagellata*; *Rotatoria*, *Gladocera*). Wśród glonów najpospolitsze są *Euglenidae* i *Chlamydomonas*. Liczne są zwłaszcza bakterie anaerobowe (*Achromobacter*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, *Escherichia coli*). W stawach wysokoobciążonych mogą występować np. bakterie z rodzaju *Desulfovibrio* redukujące siarczany. Niższy stopień oczyszczania ścieków sprzyja rozwojowi *Euglenophyta*, *Chlorophyta*, *Volvocales* i *Chlorococcales*, daleko posuniętej mineralizacji ścieków towarzyszy natomiast głównie rozwój *Chlorococcales*.

Przyrost biomasy fitoplanktonu może przewyższać $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Oczyszczanie ścieków w stawach utleniających jest bardzo rozpowszechnione, zwłaszcza w przypadku małych miast i osiedli oraz małych zakładów przemysłu rolno-spożywczego. Stawy są znacznie tańsze w eksploatacji niż oczyszczalnie ścieków i wymagają niewielkiego dozoru technicznego; dużo niższe są także koszty budowy. Stawy zajmują jednak dużą powierzchnię (około 20^2 m stawu na mieszkańca), co ogranicza ich stosowanie.

Stawy ściekowe rybne. Organizmy występujące w stawach ściekowych tworzą biocenozy podobne pod względem taksonomicznym do biocenoz stawów utleniających. Występujące różnice ilościowe są spowodowane wyżeraniem przez ryby w nich hodowane. Szczególnie intensywny jest rozwój zooplanktonu, np. produkcja *Cladocera* z rodzaju *Daphnia* może w ciągu 100 dni wynosić $1,0\text{--}1,2 \cdot 10^3 \text{ kg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$, sięgając nawet do $2,0\text{--}3,0 \cdot 10^3 \text{ kg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$ przy korzystnych warunkach tlenowo-pokarmowych. Naturalny rozkład ścieków przy udziale biocenoz stawowych wspomagany przez hodowlę ryb jest najekonomiczniejszym sposobem oczyszczania ścieków. Wysokie są efekty oczyszczania: redukcja bakterii może wynosić 99%, redukcja BZT₅ 95% i więcej. Stopień oczyszczania ścieków jest nawet większy w stawach niż w osadzie czynnym lub na złożach zraszanych. Możliwe jest usuwanie substancji organicznych aż do ich mineralizacji, a następnie usunięcie związków azotu i fosforu poprzez zmagazynowanie ich w tkankach organizmów wodnych, w tym hodowanych ryb. W stawach mogą być oczyszczane głównie ścieki bytowo-gospodarcze, niekiedy z domieszką ścieków przemysłowych, np. z cukrowni. Staw, stanowiąc naturalną oczyszczalnię biologiczną, może przyjmować wstępnie mechanicznie oczyszczone ścieki bytowe w ilości do $2000 \text{ mieszkańców} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ($5 \text{ m}^2 \cdot \text{osoba}^{-1}$). W stawach ściekowych hodowane są głównie karpie (*Cyprinus carpio*), niekiedy z domieszką linów (*Tinca tinca*); hodować można także pstrągi tęczowe (*Salmo gairdneri*). Produkcja mięsa rybiego w prawidłowo prowadzonych stawach może sięgać do $1,3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Rowy biologiczne (= rowy utleniające cyrkulacyjne). Ścieki przepływając przez system wąskich i płytkich rowów są napędzane obracającymi się szczotkami; szybkość przepływu może wynosić około $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, czas napowietrzania około 3 dni. W obliczeniach wydajności rowów przyjmuje się $0,3 \text{ m}^3$ pojemności rowu na mieszkańca. Możliwe jest oczyszczanie ścieków surowych bez konieczności stosowania osadników; w odpływie uzyskuje się wartość BZT₅ do około $15 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$. W cyrkulującym w rowach osadzie biologicznym dominują zespoły bakterii o podobnym składzie jak w osadzie czynnym, bezbarwne *Flagellata*, *Rhizopoda*, i *Ciliata*. Podobnie jak w osadzie czynnym także w rowach biologicznych kształtują się następujące prawidłowości: przewaga *Flagellata* i *Rhizopoda* świadczy o mniej zaawansowanych procesach rozkładu, natomiast przewaga *Ciliata* to wskaźnik intensywnego samooczyszczania. Wśród *Ciliata* formy pływające są z kolei wskaźnikiem nieco mniejszego stopnia oczyszczania niż formy osiadłe, których masowe występowanie świadczy o znacznym ograniczeniu dopływu ścieków i dobrze pracującym osadzie.

Złoża biologiczne. Wyróżnia się dwa typy złoża: zraszane i sflurowane. Zasadnicza różnica polega na tym, że złoża zraszane mają stosunkowo mniejszą przepuszczość ścieków i bardziej rozwiniętą błonę biologiczną, umożliwiającą prawie zupełny

rozkład ścieków. W złożach splukiwanych oczyszczana jest większa ilość ścieków w jednostce czasu, wskutek ich większego przepływu, natomiast błona biologiczna jest słabo rozwinięta i składa się prawie z samych bakterii. Rozkład ścieków nie jest zupełny, a nie rozłożony osad jest usuwany przez szybko przepływające ścieki. Obciążenie konwencjonalnych złóż zraszanych wynosi 175–225 g BZT₅ · m⁻³ · d⁻¹, a złóż splukiwanych 875 g BZT₅ · m⁻³ · d⁻¹. Złóża zapewniają nie tylko prawie 95% obniżenie BZT₅, ale i pełną nityfikację związków azotowych, o ile występują niezbędne ilości tlenu (4,33 g O₂ · g usuniętego N_{NH₄}⁻¹). W przypadku doprowadzenia do odbiornika, NH₄ np. jeziora, ścieków nie znityfikowanych zawierających azot amonowy, proces nityfikacji następować będzie w jeziorze powodując niekorzystne zmiany jakości wody. Eksploatacja złóż biologicznych może być prowadzona przez rok, jedynie wczesną wiosną i jesienią przez krótki okres następuje osłabienie działalności mikroorganizmów. Na powierzchni złóż wypełnionych materiałem o dużej powierzchni czynnej (kamienie, cegła, żużel, koks, tworzywo sztuczne) wykształca się błona biologiczna o grubości około 2 mm. W normalnie rozwiniętej błonie biologicznej na powierzchni złóż rozwijają się bakterie, zwłaszcza *Sphaerotilus natans*, glony (np. *Cyanophyta: Oscillatoriaceae*), *Flagellata (Euglena)*, a także *Bacillariophyceae*. Ze zwierząt rozwijają się bezbarwne *Flagellata, Ciliata (Aspidisca, Amphioleptus, Colpidium, Litonotus, Metopus, Opercularia, Spirostomum, Vorticella)*, *Rotatoria, Nematoda, Oligochaeta, Cladocera (Cyclopidae)* oraz *Diptera (Chironomidae)*. W razie przeciążenia złóż rozwijać się mogą w nadmiernych ilościach oprócz *Sphaerotilus natans* także grzyby (*Fusarium, Penicillium, Aspergillus*). W górnej warstwie złóż zachodzą głównie procesy aerobowe. Na głębokości około 50 cm następuje rozkład anaerobowy bez udziału glonów, ale przy masowym rozwoju bakterii (m.in. *Zoogloea, Sphaerotilus*), występowaniu bezbarwnych *Flagellata (Bodo, Cercobodo), Rhizopoda (Amoebida: Amoeba limax, A. pratensis)* i *Ciliata (Paramecium, Glaucoma, Tetrahymena, Colpidium, Metopus)*. Jeszcze inne zbiorowiska mikroorganizmów występują na głębokości około 1 m: przy widocznym ubytku bezbarwnych *Flagellata* dalej następuje masowy rozwój bakterii i niektórych gatunków *Ciliata* (np. *Aspidisca lynceus, Amphioleptus claparedei, Cyclidium glaucoma, Chilodonella uncinata, Carchesium fallax*). Liczne są niekiedy także polisaprobowe gatunki *Ciliata*. Zwierzęta w złożach przebywają głównie w warstwach głębszych; 50 cm pod powierzchnią dominują gatunki zjadające bakterie, natomiast na głębokości około 1 m wyraźnie zwiększa się udział form drapieżnych. W dolnej strefie złóż biologicznych, np. około 50 cm nad dnem zagęszczenie organizmów zmniejsza się; występują tutaj zarówno gatunki polisaprobowe, jak i *alfa* i *beta* – mesosaprobowe (liczne gatunki *Ciliata: Coleps, Euplotes, Litonotus, Vorticella, Aspidisca, Amoeba virrucosa, Rotatoria: Monostyla lunaris, Colurella; Oligochaeta: Chaetogaster, Lumbriculus variegatus, Lumbricillus lineatus*). W skład makrofauny występującej w zewnętrznych częściach złóż i w części dolnej wchodzi larwy *Diptera (Orthocladinae, Chironominae, Psychodidae: Psychoda)* i *Oligochaeta (Enchytraeidae, Lumbricidae)*.

Osad czynny. Metoda oczyszczania ścieków osadem czynnym jest najwydajniejszym sposobem, który obecnie dominuje nad innymi biologicznymi oczyszczalniami. Osad czynny składa się z kłaczków i cieczy; kłaczkki składają się natomiast ze śluzowatego podłoża na którym żyją bakterie i *Protozoa*, występujące także w cieczy osadu. Sam proces kłaczkowania osadu wywołany jest przez różne procesy fizyczne,

chemiczne i biologiczne, co tłumaczą najrozmaitsze teorie np. elektrostatyczna lub polielektrolitowa teoria kląszczowania mikroorganizmów, kląszczowanie poprzez akumulację kwasu poli *beta* – hydroksymasłowego (PHB) i tworzenie jego poliestrowych połączeń. W kląszczach przeważają bakterie zooglealne, zwłaszcza *Zooglea ramigera*, a spośród *Protozoa* bezbarwne *Flagellata*, *Rhizopoda* (*Amoebida*) i liczne gatunki *Ciliata* (zwłaszcza: *Trachelophyllum pusillum*, *Vorticella convallaria*, *V. microstoma*, *V. alba*, *Opercularia coarctata*, *Euplotes moebiusi*). W ogromnych ilościach występują *Nematoda*, często są *Rotatoria* (osad niskoobciążony i dobrze napowietrzony). Ogromną część biomasy stanowią bakterie w postaci pałeczek, koków i nitek. Stopień sprawności działania osadu czynnego określa wzajemny stosunek ilościowy bakterii i wymienionych grup *Protozoa*. W słabo lub źle działającym osadzie dominują np. bakterie z rodzaju *Spirillum* i *Sphaerotilus natans*, przy masowym występowaniu bezbarwnych *Flagellata* i *Rhizopoda* (*Amoebida*), przy bardzo niewielkiej ilości *Ciliata*. Dobrym wskaźnikiem prawidłowo działającego osadu jest *Aspidisca costata* (*Ciliata*). Osad czynny, którego obciążenie wynosi 0,3 – 1 g BZT₅ · g zawiesiny⁻¹ zawiera największą liczbę gatunków *Ciliata*, przy równomiernym rozdziale gatunków pomiędzy trzy grupy: *Holotricha*, *Peritricha*, *Hypotricha*. Wadliwe działanie osadu spowodowane może być dopływem ścieków z zawartością siarkowodoru (tzw. "puchnięcie" osadu wywołane przez bakterie *Sphaerotilus natans* lub grzyby np. *Fusarium*), związków toksycznych ze ścieków przemysłowych lub nadmiernych ilości węglowodanów, przekroczeniem odpowiedniej granicy pH (optymalne pH 7,0–7,5), temperatury i słabym napowietrzaniem. Najodpowiedniejsza temperatura dla procesów mineralizacji (np. nityfikacji) nie jest ściśle ustalona i waha się od 20° do 30° C, natomiast tempo rozkładu materii organicznej w osadzie czynnym jest największe przy temperaturze około 30° C. Osad dobrze pracujący powinien zawierać 98,5% wody. "Puchnięcie" osadu następuje, gdy zawartość wody w kląszczach osadu przekroczy 99% (do 99,75%). Niskie obciążenie osadu wynosi około 700 g BZT₅ · m⁻³ · d⁻¹, a wysokie obciążenie około 1400 g BZT₅ · m⁻³ · d⁻¹. Obciążenie dobrze pracującego osadu może wynosić do 2 g BZT₅ · g⁻¹ · d⁻¹. W stosunku do ścieków od jednego mieszkańca BZT₅ wynosi około 54 g · d⁻¹. Osad czynny musi być dobrze napowietrzony w stopniu uzależnionym od obciążenia ściekami: najczęściej zawartość tlenu wynosi 1–3 mg O₂ · dm⁻³ lub 0,5–1,5 mg O₂ · dm⁻³. Pozbawienie osadu czynnego dopływu ścieków powoduje, że do procesów oddychania komórkowego bakterie osadu zaczynają pobierać np. azotany, zredukowane następnie do wolnego azotu i azotu amonowego.

Wydzielone komory fermentacji (WKF). Przy rozwoju procesów fermentacji kwaśnej i metanowej (temperatura 25–35 C°, okres fermentacji: 25–30 dni) możliwa jest przeróbka osadów z osadników wstępnych oczyszczalni ścieków oraz osadu nadmiernego wytwarzającego się w biotechnologii osadu czynnego. Flora bakteryjna podczas fermentacji kwaśnej składa się z różnych gatunków z rodzaju *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium*, *Escherichia*, *Enterobacter* (względnie beztlenowce) oraz *Vibrio* i *Desulfovibrio* (beztlenowce). W czasie trwania fermentacji metanowej powstające kwasy organiczne (masłowy, octowy, propionowy) są intensywnie rozkładane przez bakterie metanowe (*Methanococcus*, *Methanobacterium*, *Methanosarcina*).

4. Glebowe oczyszczanie ścieków

Spośród różnych metod oczyszczania ścieków najbardziej poprawne i logiczne pod względem przyrodniczym jest glebowe wykorzystanie ścieków, oparte głównie na wykorzystaniu biochemicznych procesów utleniania ściekowej materii organicznej zrzucanej do gleby w warunkach tlenowych. Oczyszczanie w glebie jest niezwykle korzystne ponieważ stopień eliminacji związków biogenych jest bardzo wysoki (średnio około 80% eliminacja związków fosforu). Przy racjonalnym dawkowaniu ścieków eliminacja związków fosforu sięgać może do 90–100% (2). Żadna z innych metod oczyszczania ścieków nie daje tak wysokich eliminacji związków fosforu, przy jednoczesnej eliminacji związków azotu, co jest bardzo korzystne dla efektywności oczyszczania i późniejszych oddziaływań oczyszczanych ścieków na odbiornik. Nie ma bowiem sensu usuwanie ze ścieków azotu, dopóki zawierają one dużo fosforu. Przepływ energii przez glebę związany jest z procesem rozkładu substancji organicznej oraz mineralizacji węgla. Oba te procesy konkurują ze sobą i w obu biorą udział glebowe organizmy rozkładające, zwłaszcza mikroorganizmy chemoheterotroficzne. Skład taksonomiczny organizmów glebowych, będących w ogóle atrybutem pojęcia gleba, uzależniony jest ściśle od warunków w jakich przebiega rozkład ścieków w glebie. W warunkach tlenowych znaczny udział w glebowym oczyszczaniu mają zarówno mikroorganizmy (bakterie, grzyby, glony, promieniowce), jak i liczne saprofityczne bezkręgowce. Istnieje wiele poglądów dotyczących udziału różnych glebowych organizmów w rozkładzie materii organicznej i przepływie energii w glebie. Zgodnie jednak ocenia się, że podstawowym udziałem fauny glebowej w rozkładzie materii organicznej jest zwiększenie powierzchni dostępnej dla działalności mikroorganizmów w wyniku rozdrobnienia resztek organicznych, będących podstawowym procesem umożliwiającym działalność mikroorganizmów.

Po doprowadzeniu przynajmniej wstępnie oczyszczonych mechanicznie ścieków organicznych do gleby następuje filtracja i adsorpcja zawieszin nie opadających i koloidów oraz rozpoczynają się procesy biosorpcji związków organicznych na błonie biologicznej w skład której wchodzi głównie mikroorganizmy i Nematoda, otaczające poszczególne agregaty glebowe. Korzystniejsze jest przeznaczenie do oczyszczania glebowego ścieków zasobnych w materię organiczną, ponieważ zwiększa to zdolności sorpcyjne gleby, a tym samym jej możliwości zatrzymywania związków mineralnych. Ścieki nie oczyszczone biologicznie zawierają poza tym azot głównie w dobrze związanej w glebie formie amonowej, natomiast po oczyszczeniu w łatwo wymywanej z gleby formie azotanowej. W związku z tym, że oczyszczanie ścieków w glebie jest procesem bardzo złożonym, uzależnionym od wielu czynników, dlatego w projektowaniu urządzeń umożliwiających wprowadzenie ścieków do gleby należy uwzględnić zapewnienie możliwie optymalnych warunków dla przebiegu wszystkich procesów fizykochemicznych i biologicznych, umożliwiających oczyszczenie wprowadzonych ścieków. Dotyczy to zwłaszcza okresu zimowego, kiedy intensywność procesów biologicznych jest znacznie obniżona. Oczyszczanie ścieków w glebie jest szczególnie wysokie w okresie letnim. Przykładowo: na filtrach gruntowych, których działanie uzależnione jest od wielkości obciążenia, redukcja bakterii latem może wynosić 98–99%, zmniejszenie BZT₅ 95–99% i zawiesiny 85–95%. W okresie zimowym w złożu filtru gruntowego następuje jedynie filtracja mechaniczna, przy zwolnieniu lub całkowitym zaniku procesów biologicznych. Oczyszczane w filtrze

gruntowym ścieki są na ogół dobrze natlenione i charakteryzują się niewielkimi wartościami BZT₅ (5–10 mg O₂ · dm⁻³) i małym stężeniem azotanów (5–25 mg N_{NO3} · dm⁻³) (5). Zdolności do oczyszczania ścieków w glebie będącej ich odbiornikiem są jednak ograniczone. Wprowadzanie zbyt dużej ilości ścieków do gleby bardzo szybko może doprowadzić do nadmiernego przeciążenia gleby i ograniczenia lub całkowitego zaniku procesów fizykochemicznych oraz biologicznych, umożliwiających oczyszczanie ścieków w glebie. Dotyczy to zwłaszcza biologicznego utleniania związków organicznych, które najbardziej wydajnie przebiega tylko w glebach dobrze napowietrzonych. Pojęcie natleniania gleby dotyczy zagadnień związanych z rozkładem stężenia tlenu w glebie i jego dostępności dla mikroorganizmów glebowych. W naszych warunkach przyrodniczych wielkość poboru tlenu w glebie waha się od 30–300 kg O₂ · ha⁻¹ · d⁻¹ (6). Skład powietrza glebowego jest wynikiem dwóch procesów glebowych: biologicznych i biochemicznych umożliwiający ciągły pobór tlenu oraz wydalanie CO₂ i innych produktów metabolizmu oraz fizycznych procesów transportu umożliwiających stałą wymianę powietrza glebowego. Od wielkości natlenienia gleby uzależnione są jednak także zdolności utleniająco–redukcyjne gleby. W glebach naszego kraju wartość potencjału oksydo–redukcyjnego waha się w granicach od 100 do 750 mV (6). Przyjmuje się, że przy wartościach powyżej 750 mV następuje zaburzenie procesów odżywiania się roślin, natomiast wartości poniżej 200 mV związane są z występowaniem w glebach szkodliwych dla roślin procesów redukcyjnych (6). Znajomość wymienionych progowych wartości potencjału oksydo–redukcyjnego jest istotna dla przeprowadzenia rekultywacji terenów, których gleby były odbiornikiem ścieków. Przeciążenie gleby ściekami prowadzi do niedoborów tlenu, a w następstwie do niewłaściwego przebiegu procesów oksydo–redukcyjnych, co wywiera niekorzystny wpływ na związaną z nimi przyswajalność większości składników pokarmowych roślin, sprzyja powstawaniu toksycznych produktów metabolizmu bez-tlenowego w glebie, zmianom składu flory i fauny glebowej oraz zmianom odczynu gleby i wynikającym stąd następstwom.

5. Rozwój biotechnologii oczyszczania ścieków

Rozwój urządzeń do biologicznego oczyszczania ścieków polega m.in. na kształtowaniu coraz lepszych warunków aktywności mikroorganizmów. Złoża biologiczne, w których mikroorganizmy tworzą biologiczną błonę na powierzchni wypełnienia złoża, zdecydowanie zwiększają sprawność oczyszczania, jeżeli zapewni się korzystne warunki tlenowe w głębszych warstwach błony, wprowadzi się większe ilości zanieczyszczeń, zwiększy szybkość usuwania produktów metabolizmu mikroorganizmów oraz zapewni tak istotne w naszej szerokości geograficznej stabilne termiczne warunki dla przebiegu procesów biologicznych. Realizacja tych wymagań to praktycznie projektowanie stale nowych konstrukcji urządzeń do biologicznego oczyszczania ścieków. W prognostycznych ocenach rozwoju technologii oczyszczania ścieków w układach konwencjonalnych osadu czynnego i złoży biologicznych z fermentacją osadów zwraca się obecnie uwagę na działania umożliwiające zwiększenie efektywności procesów oczyszczania, zmniejszenia energochłonności i kosztów eksploatacji (7). Niezbędne jest dokładne ustalenie potrzeb energetycznych oczyszczalni z punktu widzenia wymagań procesów technologicznych oraz wprowadzenia jednolitych kryteriów doboru metod przeróbki osadów w zależności od typu i przepustowości oczyszczalni.

5.1. Biotechnologia oczyszczania ścieków miejskich i przemysłowych

Prognozuje się, że przyszłość to opracowanie szeregu rozwiązań i projektów procesowych biotechnologii oczyszczania ścieków przemysłowych o znacznej uciążliwości dla środowiska. W technologiach tych wykorzystywane będą procesy tlenowe, beztlenowe i mieszane beztlenowo-tlenowe. Dotyczy to zwłaszcza ścieków pochodzących z przemysłu browarniczego, młeczarskiego, fermentacyjnego, petrochemicznego oraz przetwórstwa skór świńskich i bydłowych, gdzie zastosowane mogą być tlenowe metody osadu czynnego lub beztlenowe (jedno- i wielostopniowej fermentacji). Do usuwania metali ciężkich ze ścieków o wysokiej zawartości siarczanów (np. z przemysłu tłuszczowego) wykorzystane mogą być bakterie *Desulfovibrio desulfuricans*. Ocenia się, że zastosowanie procesów mieszanych beztlenowo-tlenowych w technologiach oczyszczania ścieków pozwala na znaczne ograniczenie zużycia energii i zmniejszenie reaktorów w porównaniu z procesami tlenowymi. Beztlenowa technologia przy wykorzystaniu wysokoefektywnych reaktorów z zawieszonym osadem granulowanym lub o strukturze kłaczkowatej może być wykorzystana do oczyszczania, np. ścieków miejskich (tzw. ścieki niskoobciążone). Przy opracowaniu przyrodniczo-technicznych podstaw projektowania rolniczego wykorzystania ścieków muszą być uwzględnione wszystkie potencjalne możliwości zanieczyszczenia gleby i zmian w chemicznym składzie tkanek roślin porastających gleby nawadniane ściekami (np. akumulowanie się metali ciężkich). Niezbędne jest także dokładne określenie sposobu utylizacji powstałej biomasy roślinnej (np. różne metody kompostowania).

5.2. Biotechnologie przeróbki osadów i stałych odpadów komunalnych

Przyszłościowy rozwój biotechnologii związanych z przeróbką osadów ściekowych i stałych odpadów komunalnych związany jest głównie z opracowaniem procesowych podstaw stabilizacji osadów, technologii przeróbki osadów ściekowych na kompost oraz technologii pozyskiwania i wykorzystywania biogazu z wysypisk miejskich. Dokładne określenie wpływu temperatury i czasu trwania tych procesów na efektywność stabilizacji osadów ściekowych jest m.in. podstawą do możliwości ich rolniczego wykorzystania z zachowaniem wymaganych warunków sanitarnych [głównie eliminacja chorobotwórczych mikroorganizmów i jaj pasożytów jelitowych (*Cestoda: Diphyllbothrium latum, Taenia solium, Taeniarhynchus saginata; Nematoda: Enterobius vermicularis, Ascaris lumbricoides hominis, Trichocephalus trichiura*)]. Tego typu biotechnologie umożliwiają przetworzenie osadów płynnych na kompost razem z nadwyżką biomasy roślinnej oraz kompostowanie osadów ściekowych bezpośrednio na terenie oczyszczalni ścieków. Warto podkreślić, że niekonwencjonalnym źródłem energii jest złożo wysypiska odpadów komunalnych o intensywnie zachodzących procesach biochemicznego rozkładu. Ocenia się, że pozyskiwanie biogazu z dużych wysypisk, gdzie bardzo często składowane są także osady ściekowe, może być tak duże, że niezależnienie gospodarki energetycznej wysypiska od zewnętrznych źródeł energii będzie możliwe już po dwuletnim okresie eksploatacji przy późniejszej nadprodukcji oczyszczonego biogazu.

Powstałe w naszym kraju w latach siedemdziesiątych oczyszczalnie ścieków typu "Bioblok" pozwoliły na prowadzenie biologicznego oczyszczania ścieków bytowo-

gospodarczych lub ścieków o właściwościach do nich zbliżonych w ilości: $100 - 800 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Zgodnie z istniejącymi trendami światowymi przyjęto, że podstawowym rozwiązaniem małych oczyszczalni ścieków ($10-100 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) powinny być ciągi technologiczne opierające się na zastosowaniu niskoobciążonego osadu czynnego o przedłużonym napowietrzaniu, umożliwiające jednocześnie tlenowe ustabilizowanie nadmiernego osadu czynnego, co upraszcza dalszą przeróbkę i zagospodarowanie osadów ściekowych. Coraz częściej konstruowane są obecnie także oczyszczalnie ścieków, których technologia opiera się na zastosowaniu tarczowych złóż biologicznych z unieszkodliwieniem osadu w warunkach beztlenowych oraz reaktory beztlenowe dla zintensyfikowania procesów denitryfikacyjnych i defosfatacyjnych. W warunkach naturalnych na terenach o intensywnej gospodarce rolnej coraz częściej niezbędne jest biologiczne eliminowanie spływających ze zlewni zanieczyszczeń poprzez metody związane z wykorzystywaniem składników struktury krajobrazu, np. naturalnych małych zbiorników wodnych śródpolnych pozwalających na eliminowanie wielu form użyźnień chemicznych. Istnieją możliwości bardzo dużego wpływu na przebieg tych procesów, a nawet sterowanie nimi (np. przy rekultywacji cieków przeciężonych ściekami, hamowanie allotroficznych spływów ze zlewni).

Literatura

1. Margalef R., (1975), External factors and ecosystem stability. Schweiz. Zeitschr. f. Hydrol., 37, 102-117.
2. Kajak Z., (1979), Eutrofizacja jezior, PWN, Warszawa.
3. Vollenweider R.A., (1968), Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters. OECD, Paris.
4. Vollenweider R.A., (1976), Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 33, 53-83.
5. Kasprzak K., Lemański J., Szparaga Z., (1985), Techniczne, sanitarne i ekologiczne problemy oczyszczania ścieków w glebie, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 5-6, 136-140 (cz.I); 7, 160-162 (cz.II).
6. Gliński J., (1982), Problemy badań agrofizycznych, w: J.Gliński, K.Boratyński, S.Tolpa, Agrofizyka, nawożenie, biogeny torfopochodne. Wszechnica PAN, Ossolineum, Wrocław.
7. Bernacka J., Błaszyk P., (1988), Cele i zadania programów resortowych R-4 i R-6 dotyczących unifikacji oczyszczalni ścieków i biotechnologii w ochronie środowiska, w: Materiały XXVII krajowej konferencji naukowo-technicznej pt. "Postęp techniczny w dziedzinie oczyszczania ścieków" tom 1, 582, 50-59, PZITS Oddział w Katowicach.