

Hydrofitowe oczyszczalnie ścieków bytowych jako przykład gospodarki wodno-ściekowej na terenach o zabudowie rozproszonej

Hydrophytic treatment plants for domestic wastewater as an example of water and wastewater management in dispersed housing areas

Dorota Olejnik, Aleksandra Mamrot^{*}

Słowa kluczowe: oczyszczalnie hydrofitowe, odprowadzanie ścieków z terenów wiejskich, rośliny hydrofitowe

Streszczenie

Hydrofitowe oczyszczalnie ścieków stanowią alternatywne rozwiązanie problemów, związanych z odprowadzaniem nieczystości z budynków mieszkalnych, znajdujących się na obszarach nieskanalizowanych o zabudowie rozproszonej. Systemy te wykorzystują, zarówno procesy mechanicznego, jak i biologicznego oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych, pochodzących z gospodarstw domowych. Wolne od zanieczyszczeń ścieki transportowane są do studni chłonnych lub zbiorników wodnych.

Keywords: *constructed wetlands, sewage disposal from rural areas, hydrophyte plants*

Abstract

Constructed wetlands provide an alternative solution to problems associated with the disposal of wastewater from residential buildings located in unsewered areas with dispersed development. These systems use both mechanical and biological processes to treat domestic wastewater. Contaminant-free wastewater is transported to absorption wells or water bodies.

Wstęp

Odprowadzanie ścieków z terenów wiejskich o zabudowie rozproszonej jest problematyczne i wiąże się z wieloma utrudnieniami. Obszary te charakteryzują się często niedużymi oraz znacznie oddalonymi od siebie miejscowościami, w których poziom zaludnienia, przypadający na powierzchnię terenu jest niewielki – rzędu ok. 25 M/ha [17]. Według danych udostępnionych przez GUS w 2023 r. – „Na obszarach wiejskich znajdowało się 60,4 % sieci kanalizacyjnej oraz 47,4 % wszystkich przyłączy kanalizacyjnych do budynków mieszkalnych. W porównaniu z rokiem poprzednim długość sieci na terenach wiejskich wzrosła o 2,8 tys. km (o 2,6 %), a liczba przyłączy do budynków mieszkalnych o niemal 60,9 tys. szt. (o 3,4 %)”. Widoczna jest również znaczna dysproporcja pomiędzy długością sieci wodociągowej, a sieci kanalizacyjnej. Pod koniec 2023 r. długość sieci wodociągowej osiągnęła 341,1 tys. km, zaś sieci kanalizacyjnej 181,5 tys. km.[10] Pomimo zaobserwowania wzrostu budowy sieci kanalizacyjnej na obszarach wiejskich, zgodnie z informacjami przedstawionymi przez GUS „W 2023 r. oczyszczalnie ścieków obsługiwały 75,9% ludności kraju (w miastach 94,8%, na wsi 48,2%)”[8]. Transport ścieków na znaczne odległości, ich nierównomierny dopływ oraz potrzeba stosowania licznych pompowni

związana ze zróżnicowaniem w ukształtowaniu terenu, sprawiają, że budowa infrastruktury kanalizacyjnej oraz oczyszczalni ścieków, wymaga ogromnych nakładów finansowych [17]. Brak odpowiednio rozwiniętej infrastruktury kanalizacyjnej na terenach o zabudowie rozproszonej, zrzuca na mieszkańców tych obszarów, obowiązek stosowania indywidualnych systemów oczyszczania ścieków. Rozwiązaniem tego problemu mogą być przydomowe oczyszczalnie ścieków lub zbiorniki bezodpływowe, tzw. szamba. [22]

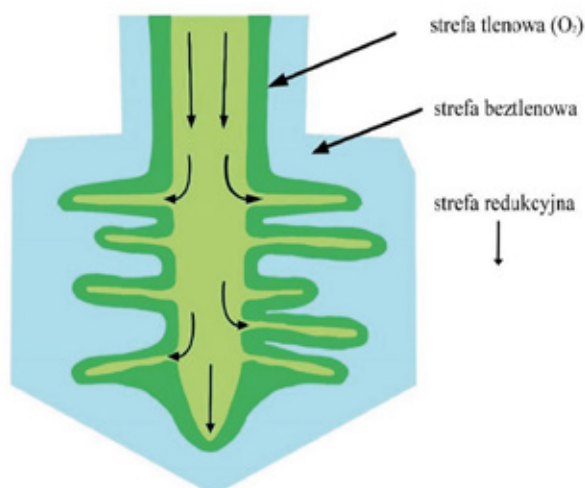
Według danych GUS „Liczba przydomowych systemów do odprowadzania ścieków na koniec 2023 r. w Polsce wyniosła 2 495,8 tys. szt., z czego 83,6 % (2 085,9 tys. szt.) przypadło na zbiorniki bezodpływowe, a 16,4 % (409,0 tys. szt.) na przydomowe oczyszczalnie ścieków”[10]. Jak z tego wynika zbiorniki bezodpływowe nadal cieszą się w Polsce dużą popularnością. Urządzenia te charakteryzują się prostą konstrukcją i niewielkimi kosztami inwestycyjnymi. Wymagane jest jednak ich okresowe opróżnianie (średnio co 3-4 tygodnie) przez pojazdy asenizacyjne, co generuje spore koszty wywozu w skali roku. Alternatywnym rozwiązaniem zagospodarowania ścieków pochodzących z indywidualnych gospodarstw domowych, są przydomowe oczyszczalnie ścieków. Nie stwarzają one zagrożenia dla środowiska, o ile jakość odprowadzonych z nich ścieków

^{*} Dorota Olejnik – Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Al. Politechniki 6, 93-590 Łódź, dorota.olejnik@p.lodz.pl, ORCID ID: 0000-0001-5809-1214; Aleksandra Mamrot – EKO-KOMPLEKS, J. Fidrysiak, J. Budzińska S.J., ul. Guzewska 14, 95-030 Rzgów

oczyszczonych spełnia odpowiednie normy i wymogi prawne. Dostępne są różne warianty przydomowych oczyszczalni, różniące się stosowanymi w układzie urządzeniami oraz jednostkowymi procesami oczyszczania [22].

1. Charakterystyka metody hydrofitowej

Oczyszczalnie hydrofitowe (ang. *constructed wetlands*) to systemy które odtwarzają naturalne warunki hydrauliczne, jak również procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne zachodzące na terenach podmokłych. Obiekty hydrofitowe utrzymują glebę w stanie nasycenia tworząc optymalne środowisko dla rozwoju roślin wodnych lub wodolubnych tzw. makrofitów oraz mikroorganizmów heterotroficznych. Ścieki odprowadzane do systemów hydrofitowych przepływają przez rozbudowaną ryzosferę roślinną która asymiluje zawarte w nich związki biogenne, czy metale ciężkie [31]. Tlen z atmosfery transportowany jest do części podziemnych roślin za pomocą specjalnej tkanki gazowej (aerenchyma) znajdującej się w łodygach oraz liściach makrofitów. Prowadzi to do powstania wokół korzeni i kłączy roślin, trzech mikrosterf: tlenowej (O_2), beztlenowej oraz redukcyjnej (rys.) [18]. Tworzą się wówczas odpowiednie warunki dla rozwoju mikroorganizmów heterotroficznych, odpowiedzialnych za przekształcanie zawartych w ściekach substancji organicznych w związki prostsze i nowy materiał komórkowy. Przemiany te zachodzą zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych. Systemy hydrofitowe stanowią również siedlisko dla różnego rodzaju owadów czy bezkręgowców, które rozdrabniają powstały detrytus oraz żywią się niepożądanymi w układzie larwami komarów [5].



Rys. Schemat warunków utleniająco-redukcyjnych występujących wokół kłączy roślin wodnych [18]

Fig. Diagram of oxidation-reduction conditions occurring around the rhizomes of aquatic plants [18]

Oczyszczalnie hydrofitowe wykorzystują również procesy sedymentacji oraz filtracji w wyniku kontaktu ścieków z materiałem wypełnienia, np. gruntem czy żwirem [20].

Metoda hydrofitowa bazuje na oczyszczaniu ścieków z wykorzystaniem naturalnej roślinności oraz rozwijających się mikroorganizmów, dzięki czemu charakteryzuje się niewielkimi kosztami budowy, łatwością eksploatacji oraz zasadniczo nie wymaga konserwacji. W przeciwieństwie do konwencjonalnych technologii, systemy hydrofitowe wykazują niewielkie zapotrzebowanie na energię elektryczną, zapewniają łatwą kontrolę nieprzyjemnych zapachów oraz nie wytwarzają wtórnych osadów ściekowych [25]. Wykazują również odporność na nierównomierny dopływ ścieków. Ważnym aspektem są również walory estetyczne oczyszczalni hydrofitowej [2]. Stosowane w układzie naturalne rośliny bagienne dobrze kom-

ponują się z otaczającym krajobrazem oraz stanowią siedlisko dla dzikiej przyrody. Instalacja systemu hydrofitowego wymaga terenu o znacznej powierzchni. Ogromnym minusem jest również długi okres, potrzebny do całkowitego rozwoju ryzosfery makrofitów [18].

2. Procesy usuwania zanieczyszczeń w systemach hydrofitowych

Mechanizm usuwania zanieczyszczeń w oczyszczalniach hydrofitowych, bazuje na współdziałaniu zarówno procesów fizycznych, jak i biochemicznych. W oczyszczalniach hydrofitowych odbywa się redukcja substancji organicznych, azotu, fosforu, metali ciężkich czy obecnych w ściekach patogenów [4]. Uspokojony przepływ ścieków przez warstwę złoża umożliwia swobodne opadanie większych cząstek na skutek procesów sedymentacji. Dodatkowo zanieczyszczenia poddawane są również, takim procesom fizycznym jak: filtracja i sorpcja. Biochemiczne oczyszczanie ścieków wspierane jest przez asymilację zanieczyszczeń przez rośliny oraz metabolizm mikroorganizmów [19].

2.1. Mechanizm usuwania związków organicznych

Materia organiczna odprowadzana wraz ze ściekami występuje w postaci: fazy ciekłej (rozpuszczonej) oraz fazy stałej (zawiesiny). Po wstępnym podczyszczeniu w osadniku gnilnym, ścieki dopływające do złoża systemu hydrofitowego, bogate są w węgiel organiczny w formie rozpuszczonej. Pomiar wartości BZT₅ określa stężenie substancji organicznych podatnych na rozkład biochemiczny w ściekach. Materia organiczna wyrażona jako parametr BZT₅ redukowana jest na skutek procesów sedymentacji, filtracji oraz biochemicznego rozkładu rozpuszczonych związków organicznych przez mikroorganizmy zasiedlające układ [18].

Rozkład tlenowy związków organicznych odbywa się przy udziale bakterii chemoheterotroficznych oraz chemoautotroficznych. Korzenie roślin makrofitowych transportują tlen niezbędny do rozkładu substancji organicznych, bezpośrednio do ryzosfery [30]. Umożliwia to pobranie tlenu przez bakterie, które wykorzystują go jako akceptor elektronów [19]. Następuje utlenienie substancji organicznych oraz uwolnienie dwutlenku węgla, amoniaku czy innych ustabilizowanych związków chemicznych [4]. Rozkład związków organicznych dostarcza bakterii niezbędną do życia energię oraz stanowi materiał budulcowy dla biomasy [15]. Obecny w materii organicznej, azot rozkładany jest przez organizmy chemoautotroficzne w wyniku procesu amonifikacji. Metabolizm substancji organicznych jest szybszy w przypadku bakterii chemoheterotroficznych, które odpowiadają głównie za redukcję BZT₅ w ściekach [30]. Intensywność procesów rozkładu tlenowego zależy od dostępności w układzie rozpuszczonego tlenu oraz materii organicznej [19].

Rozkład beztlenowy odbywa się przy udziale beztlenowych fakultatywnych lub obligatoryjnych bakterii heterotroficznych [30]. Proces ten realizowany jest w czterech fazach: hydrolizy, acidogenezy, acetogenezy oraz metanogenezy. W systemach hydrofitowych występuje zazwyczaj faza druga i trzecia. Hydroliza związków organicznych zachodzi jeszcze przed oczyszczaniem biologicznym w osadniku gnilnym [4]. Podczas fermentacji kwaśnej, bakterie kwasotwórcze rozkładają substancje organiczne do alkoholi i kwasów organicznych. Następnie w fazie octanogenezy, dochodzi do utlenienia tych produktów do kwasu octowego, dwutlenku węgla i wodoru. W ostatniej fazie, bakterie metanogenne produkują metan z produktów fazy poprzedzającej [19]. Bakterie te są wrażliwe na niskie wartości pH oraz wahania w stężeniu tlenu w systemie. Przekłada się to najczęściej na zanik fazy metanogenezy [30].

2.2. Mechanizm usuwania związków azotu

Ścieki dopływające do oczyszczalni hydrofitowej mogą być bogate w różne formy azotu takie jak: azot organiczny – Norg, azot amonowy, azotany (III) oraz azotany (V) [25]. Systemy hydrofitowe wykorzystują procesy amonifikacji, nitryfikacji oraz denitryfikacji w celu usunięcia azotu obecnego w ściekach. Możliwe jest również

zatrzymanie azotu w układzie na skutek adsorpcji na powierzchni złoza, jak również asymilacji przez roślinny makrofitowy [6].

Amonifikacja polega na mineralizacji azotu organicznego (Norg) obecnego w ściekach do azotu amonowego (NH_4/NH_3) z udziałem mikroorganizmów. Proces ten postępuje najszybciej w strefach tlenowych złoza, zaś znacząco spowalnia i zmniejsza wydajność w strefach beztlenowych. Amonifikacja przebiega skutecznie przy pH w zakresie od 6,5 do 8,5. Optymalna temperatura wynosi od 40 do 60 °C. Wydajność procesu dochodzi do 0,53 gN/(m²·d) [14]. Powstający azot amonowy może również uwalniać się do atmosfery. Jednak proces ten ma sens tylko w przypadku, gdy w dopływających ściekach występują duże stężenia amoniaku, rzędu 20 mgNH₃/dm³ [6].

Kolejnym etapem usuwania azotu w systemach hydrofitowych jest nitrifikacja. Proces ten ma charakter cheomoautotroficzny i zachodzi wyłącznie w środowisku tlenowym. Nitrifikacja przebiega w dwóch następujących po sobie etapach, dzięki obecności w układzie odpowiednich bakterii, wykorzystujących proces utleniania amoniaku jako źródło energii. Pierwszy etap polega na utlenieniu azotu amonowego do azotanów (III) z udziałem bakterii chemolitotroficznych np. *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, czy *Nitrosospira*. Następnie, w drugim etapie dochodzi do utlenienia azotanów (III) do azotanów (V), dzięki fakultatywnym bakterii chemolitotroficznym z grupy *Nitrobacter* [15]. Nitrifikacja zachodzi optymalnie przy neutralnym pH, równym 7,5–8,5. Ważnym czynnikiem jest również temperatura z zakresu 25–30 °C, która znacząco wpływa na rozwój nitrifikatorów [9]. Systemy hydrofitowe cechują się szerokim zakresem wydajności procesu nitrifikacji, rzędu 0,01 do 0,161 gN/(m² · d).

Powstałe na skutek procesu nitrifikacji azotany (V) są redukowane przez bakterie heterotroficzne np. *Bacillus* czy *Micrococcus*, do postaci azotu cząsteczkowego (N₂) oraz ditlenku azotu (N₂O) w wyniku denitrifikacji. Charakter procesu przypomina tlenowe oddychania mikroorganizmów, które zamiast tlenu korzystają z azotanów jako akceptorów elektronów. Denitrifikacja jest procesem nieodwracalnym, zależnym od obecności w układzie węgla organicznego w warunkach niedotlenionych oraz potencjału utleniająco–redukcyjnym od +350 do +100 mV. W systemach hydrofitowych węgiel pozyskiwany jest ze związków organicznych dopływających wraz ze ściekami oraz z rozkładu roślinności i mikroorganizmów [16]. Redukcja azotanów przebiega sprawniej przy niskim stężeniu tlenu < 0,3 mg/l oraz temperaturze od 60 do 75 °C. Optymalne pH powinno utrzymywać się na poziomie od 6 do 8. Wydajność procesu denitrifikacji w systemach hydrofitowych jest spora i wynosi 0,003–1,020 gN/(m² · d) [6].

Azot może być również zatrzymywany w systemie dzięki akumulacji przez roślinność wodną oraz procesom adsorpcji w wypełnieniu złoza. Makrofity pobierają ze środowiska nieorganiczne formy azotu i przekształcają je w formy organiczne, służące jako budulec tkanek [16]. Proces adsorpcji oraz wymiany jonów N-NH_4^+ przez wypełnienie złoza systemów hydrofitowych nie wpływa znacząco na usuwanie azotu. W wyniku adsorpcji usuwane jest wyłącznie około 10 % azotu obecnego w ściekach [9].

2.3. Mechanizm usuwania związków fosforu

Związki fosforu zawarte w ściekach dopływających do oczyszczalni hydrofitowych usuwane są dzięki zachodzącym przemianom biotycznym i abiotycznym. Pierwiastek ten występuje w ściekach w formie nieorganicznej pod postacią ortofosforanów, polifosforanów oraz w formie fosforu organicznego [6]. Korzenie makrofitów czerpią fosfor z roztworów zgromadzonych w wolnych przestrzeniach gleby, czyli porach. Następnie, pierwiastek ten jest transportowany i ostatecznie asymilowany w częściach nadziemnych roślin. W początkowym okresie wegetacji, gdy rośliny wodne wypuszczają nowe pędy, pobór fosforu ze środowiska jest największy. W wyniku procesu obumierania roślin, fosfor zawracany jest z części nadziemnych martwych szczątków roślinnych tzw. detrytus, do korzeni i kłączy, gdzie następuje jego kumulacja. Nagromadzone na powierzchni gleby

martwe tkanki roślinne ulegają procesom tlenowego i beztlenowego rozkładu. Nowy poziom glebowy powstaje z detrytus, pozostałego po rozkładzie. Obecny wówczas w obumarłej biomase fosfor zostaje na długo zatrzymany w systemie. Okresowe usuwanie martwych szczątków roślinnych z układu, zapewnia znaczny wzrost redukcji fosforu [6].

Fosfor nieorganiczny odprowadzany jest wraz ze ściekami do oczyszczalni hydrofitowych bądź powstaje poprzez mineralizację fosforu organicznego. Wodorotlenki żelaza (III) i glinu (III) występujące na powierzchni gleb kwaśnych, stanowiących wypełnienie systemów hydrofitowych adsorbują i strącają fosfor nieorganiczny powodując jego zahamowanie. W przypadku systemów bogatych w gleby o odczynie alkalicznym procesy adsorpcji oraz strącania, wspierane są dzięki związkom wapna (II) [14].

2.4 Mechanizm usuwania metali ciężkich

Metale ciężkie nie ulegają degradacji, zatem posiadają zdolność do gromadzenia się w środowisku. Pierwiastki ciężkie obecne w ściekach dopływających do oczyszczalni hydrofitowych występują zazwyczaj w postaci rozpuszczonej, koloidalnej bądź pod postacią cząstek [9]. Do procesów redukujących stężenie metali ciężkich, zaliczyć można: sedymentację, filtrację, adsorpcję, strącanie oraz ich akumulację w roślinach [13]. Metale ciężkie dopływające wraz ze ściekami do systemów hydrofitowych ulegają procesom filtracji. Podczas przepływu napotykać na swojej drodze materiał porowaty, stanowiący wypełnienie złoza oraz rozbudowane systemy korzeniowe makrofitów. Proces sedymentacji wspierany jest poprzez mechanizm strącania metali ciężkich. Tworzące się na skutek tego procesu większe cząstki, sedymentują i opadają na dno kwatery, gdzie zostają zatrzymane w wypełnieniu złoza [9]. Jednym z głównych procesów obniżających stężenie metali ciężkich w ściekach jest ich biologiczne wytrącanie powodujące tworzenie się ich nierozpuszczalnych siarczków przy pomocy bakterii beztlenowych takich jak *Desulphovibrio*. Powstałe na skutek działalności mikroorganizmów, jony siarczkowe wchodzi w reakcje z jonami metali, wytrącając je w formie nierozpuszczalnych osadów [17]. Mechanizm ten zmniejsza stężenie szkodliwych pierwiastków w wodzie, gdyż wytrącone metale gromadzą się w osadzie lub ziarnach złoza [6]. Mikroorganizmy zdolne są również do skupiania metali ciężkich na powierzchni komórek w wyniku procesu biosorpcji. Mechanizm ten polega na adsorpcji, czyli wiązaniu nierozpuszczalnych związków metali z aktywnymi grupami związków chemicznych w obrębie osłon komórkowych mikroorganizmów np. błon czy ścianek. Wynikiem translokacji metali ciężkich przez błony jest ich wewnątrzkomórkowe gromadzenie [18].

Makrofity w przeciwieństwie do roślin lądowych charakteryzują się większą przyswajalnością metali ciężkich. Stężenie szkodliwych pierwiastków w roślinach wodnych jest znacznie większe niż w otaczającym środowisku. Częsty brak wykształconej bariery biologicznej powoduje biernie pobieranie większej ilości metali ciężkich przez rośliny, niż wynika to z faktycznych potrzeb. Do najczęściej biernie pobieranych metali przez makrofity należą: ołów, kadm, nikiel czy molibden [19].

3. Klasyfikacja systemów hydrofitowych

Systemy hydrofitowe można podzielić w zależności od rodzaju zastosowanej w układzie roślinności na:

- systemy z roślinnością bagienną (RZM – ang. *Root Zone Method*) – są to systemy gruntowo–wodne, obsadzone roślinnością charakterystyczną dla danego obszaru. Podczas przepływu ścieków przez rozbudowaną ryzosferę roślin, następuje proces filtracji zawiesin i większych cząstek.
- systemy z roślinnością wodną zakorzenioną – występują w formie rowów usytuowanych w ziemi o ciągłym przepływie ścieków. Korzenie roślin wodnych tworzą optymalne warunki dla rozwoju

mikroorganizmów. Pobierają one obecne w ściekach zanieczyszczenia i zużywają je w wyniku procesów metabolizmu.

- systemy z roślinnością wodną pływającą – składają się z co najmniej dwóch stawów, do których doprowadzane są ścieki po mechanicznym podczyszczeniu. Wstępne oczyszczanie następuje w pierwszym stawie w wyniku napowietrzania oraz redukcji zawiesin czy BZT₅. Następnie ścieki przepływają z niewielką prędkością przez drugi staw, gdzie czas zatrzymania wynosi od 2 do 3 tygodni [20].

Oczyszczalnie hydrofitowe można klasyfikować również w zależności od kierunku przepływu ścieków na:

- systemy z powierzchniowym przepływem ścieków,
- systemy z podpowierzchniowym przepływem ścieków, dzielone na:
 - systemy z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków,
 - systemy z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków [20].

3.1. Systemy z powierzchniowym przepływem ścieków

W systemach z przepływem powierzchniowym (FWS – ang. *Free Water Surface Flow* lub SF – ang. *Surface Flow*) dochodzi do powolnego przepływu ścieków wzdłuż kwatery na wysokości do 30 cm nad powierzchnią mułu dennego. System ten zasiedlany jest przez makrofity wynurzone ponad poziom ścieków [6]. Oczyszczalnie z przepływem powierzchniowym konstruowane są w formie płytkich rowów serpentynowych lub stawów z poprzecznie ułożonymi groblami, wypełnionych materiałem porowatym np. żwirem. W celu uniknięcia przenikania ścieków do warstwy wodonośnej, dno oraz skarpy pokrywa się geomembraną lub gliną. Dno kwatery układa się ze spadkiem mniejszym lub równym 0,5 ‰ [20].

Kontakt powierzchni ścieków z atmosferą oraz ich powierzchniowy przepływ sprawia, że systemy FWS są najbardziej zbliżone do naturalnych ekosystemów bagiennych i mogą stanowić siedlisko dla dzikich zwierząt. Obiekty FWS stosowane są do oczyszczania ścieków bytowo–gospodarczych np. oczyszczalnie hydrofitowe typu „Lemna”, wód opadowych lub jako III stopień oczyszczania w postaci stawów czy lagun [20].

3.2. Systemy z podpowierzchniowym przepływem ścieków

W systemach z podpowierzchniowym przepływem (VSB – ang. *Vegetated Submerged Beds* lub SSF – ang. *Subsurface Flow*), ścieki z niewielką prędkością płyną pod powierzchnią gruntu przez ośrodki porowate – piasek lub żwir. Korzenie roślinności wodnej wrastają w dno materiału filtracyjnego. Dobór makrofitów oraz kierunek przepływu ścieków wpływa na głębokość projektowanej warstwy złoża. Miąższość wypełnienia waha się w zakresie od 0,60 do 1,20 m. Dno wykonuje się zazwyczaj ze spadkiem od 1 do 3 ‰. Systemy VSB dzieli się na dwa zasadnicze rodzaje – systemy z poziomym przepływem ścieków oraz systemy z pionowym przepływem ścieków [20].

3.2.1 Systemy z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków

Systemy z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków (HF–CW – ang. *Horizontal Flow Constructed Wetland*) to baseny wypełnione porowatym złożem – najczęściej piaskiem lub żwirem, wspierającym rozwój roślinności makrofitowej. Dno podłoża uszczelniane jest nieprzepuszczalną geomembraną [9]. W celu usprawnienia warunków pracy, złoża HF–CW są okresowo podtapiane [6]. Systemy HF–CW są najczęściej stosowane jako II stopień oczyszczania ścieków bytowo–gospodarczych, zaś ich powierzchnia jednostkowa powinna wynosić ok. 5–10 m²/M [9].

Początkowo ścieki transportowane są do złoża rurą perforowaną umieszczoną na całej szerokości basenu [6]. Zapewnia to równomierne rozprowadzenie ścieków przez warstwę wypełnienia [11].

Następnie przepływają poziomo, czyli równoległe do powierzchni przez ryzosferę makrofitów zasiedlających system. Ścieki po przejściu przez wypełnienie złoża zbierane są ponownie rurą perforowaną i odprowadzane z systemu [6].

Systemy HF–CW charakteryzują się niskim poziomem usuwania fosforu oraz azotu. Proces nityfikacji ograniczony jest przez nieodpowiednie dotlenienie ryzosfery. Natomiast sama roślinność tylko okresowo akumuluje niewielką ilość związków biogenych [6].

3.2.2 Systemy z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków

Budowa systemów z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków (VF–CW – ang. *Vertical Flow Constructed Wetland*) zbliżona jest do systemów HF–CW. Podstawę stanowi basen obsadzony roślinnością makrofitową, wypełniony warstwami piasku lub żwiru, których gradacja wzrasta wraz z głębokością złoża [9]. Istotą działania obiektów VF–CW jest okresowe zalewanie złoża ściekami. Dozownik dostarcza je w odpowiednich porcjach, od góry za pomocą systemu dystrybucji. Ścieki powoli przesączają się przez materiał filtracyjny, a następnie odprowadzane są przez ułożone w dnie rury drenażowe. Po całkowitym opróżnieniu w basenie zbiera się powietrze. Kolejna porcja ścieków powoduje zatrzymanie powietrza, co przekłada się na dobre natlenienie systemu. W celu usprawnienia dostępu tlenu stosuje się również rury wywiewne, montowane pomiędzy rurami drenażowymi, odpowietrzające system [6]. Okresowe dozowanie ścieków w systemie VF–CW zapewni dostarczenie tlenu w ilości od 23 do 64 gO₂/m³d. W przypadku systemów HF–CW tlen dostarczany jest wyłącznie dzięki roślinności makrofitowej w ilości 2 gO₂/m³d [11].

Obiekty pionowym przepływem charakteryzują się mniejszym jednostkowym zapotrzebowaniem na powierzchnię, rzędu 1–3 m²/M oraz niskimi kosztami inwestycyjnymi. Oczyszczalnie ze złożem VF–CW pracują praktycznie przez cały rok, nawet w okresach zimowych. Dzięki wysokiej redukcji azotu amonowego znalazły zastosowanie w oczyszczaniu ścieków pochodzących ze składowisk odpadów, zakładów mleczarskich, czy zakładów produkujących żywność oraz jako drugi etap oczyszczania ścieków bytowo–gospodarczych [6].

4. Budowa hydrofitowych oczyszczalni ścieków

Najpopularniejszymi oczyszczalniami hydrofitowymi w Polsce są systemy oparte na podpowierzchniowym przepływie ścieków. Stosuje się systemy HF–CW oraz VF–CW które różnią się kierunkiem przepływu ścieków, wypełnieniem warstwy złoża filtracyjnego oraz gatunkami roślin zasiedlających system [21].

W skład elementów hydrofitowej oczyszczalni ścieków, wchodzi:

- osadnik gnilny – odpowiedzialny jest za wstępne podczyszczenie ścieków, na skutek procesów sedymentacji i flotacji. Dodatkowo zachodzi w nich również fermentacja osadów ściekowych. Całkowity czas trwania beztlenowej stabilizacji wynosi od 90 do 120 dni lub więcej [22]. Najczęściej, osadniki gnilne mają postać szczelnych zbiorników składających się z jednej, dwóch czy trzech szeregowo połączonych ze sobą komór, wykonanych z tworzywa sztucznego np. polietylenu [21]. Przed wylotem, montowane są niekiedy, wypełnione kształtkami polietylenowymi, kosze filtracyjne. Zmniejszają one prędkość przepływu ścieków oraz zapobiegają gromadzeniu się nadmiernej ilości zawiesiny w odpływie. Poprawnie eksploatowany osadnik jest w stanie obniżyć BZT₅ od 25 do 40 %, zawiesiny ogólne ≤ 80 %, zaś azot ogólny ≤ 40 % [22].
- przepompownia – składa się z szczelnego zbiornika, pokrywy oraz wjazdu dobieranego w zależności od ukształtowania terenu. Posiada również system tłoczenia, oparty na działaniu jednej bądź dwóch pomp zatapialnych. Załączają się one wówczas, gdy ilość ścieków w zbiorniku osiągnie odpowiedni poziom – mierzony przez

wyłącznik pływakowy. Zanieczyszczenia przetłaczane są następnie rurociągiem z poziomu niższego do poziomu wyższego. Po opróżnieniu zbiornika do określonego minimum, następuje wyłączenie pompy. Zaletą takiego działania jest obniżenie zużycia energii.

- drenaż rozsączający lub system dystrybucji ciśnieniowej – drenaż rozsączający składa się z rur perforowanych wykonanych z tworzywa sztucznego. Zasada działania opiera się na równomiernym rozprowadzaniu w głęb złoża, wstępnie podczyszczonych ścieków. W przypadku systemów z pionowym przepływem, ścieki dostarczane są na filtr roślinny w sposób porcjowy przez pompę, do systemu rur dystrybucyjnych, w których wykonane są otworki przez które ścieki równomiernie rozprowadzane są na powierzchni złoża [6].
- filtr gruntowo-roślinny – w zależności od kierunku przepływu ścieków, wypełniane są warstwami żwiru i/lub piasku o różnym uziarnieniu. Na powierzchni filtra sadzone są różne gatunki roślinności makrofitowych.
- drenaż zbierający – oczyszczone ścieki zbierane są przez rury z nacięciami wykonane z tworzywa sztucznego. Jako drenaż zbierający najczęściej stosowane są to rury melioracyjne, bądź rury giętkie przeznaczone do odwadniania terenu. Wypełnienie filtracyjne rowów należy przewietrzać z zastosowaniem wentylacji – wysokiej lub niskiej. Wentylacja wysoka składa się z rury wyprowadzonej min. 50 cm powyżej kalenicy dachu. Wentylacja niska ma postać studzienki z kominkiem napowietrzającym, wyprowadzanym na wysokość 50 cm powyżej powierzchni gruntu [21].
- studnia chłonna lub zbiornik wodny – odbiornikiem oczyszczonych ścieków może być bezpośrednio zbiornik wodny usytuowany na działce lub studnia chłonna, która służy do wprowadzania ścieków do gruntu. Rozwiązanie to stosowane jest wówczas, gdy niemożliwe jest odprowadzenie przefiltrowanych ścieków do wód powierzchniowych.

5. Przydomowe oczyszczalnie ścieków w świetle prawa

Budowa indywidualnego systemu oczyszczania w większości przypadków nie wymaga pozwolenia wodnoprawnego, czy pozwolenia na budowę [23]. W myśl art. 33 ust. 4 pkt 2 Prawa wodnego „Zwykłe korzystanie z wód służy zaspokojeniu potrzeb własnego gospodarstwa domowego lub własnego gospodarstwa rolnego. Zwykłe korzystanie z wód obejmuje: wprowadzanie ścieków do wód lub do ziemi w ilości nieprzekraczającej łącznie 5 m³ na dobę”. W takim przypadku pozwolenie bądź zgłoszenie wodnoprawne nie jest potrzebne [24]. Dodatkowo zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych par. 11 ust. 4 pkt 2 „BZT5 ścieków dopływających do indywidualnego systemu oczyszczania ścieków jest zredukowane co najmniej o 20 %, a zawartość zawiesiny ogólnej co najmniej o 50 %” [25]. Natomiast zgodnie z art. 29 ust. 1 pkt 5 Prawa budowlanego pozwolenie na budowę nie jest wymagane w przypadku „oczyszczalni ścieków o wydajności do 7,50 m³ na dobę”. Nie jest podany konkretny rodzaj czy przeznaczenie oczyszczalni, dlatego można tu zaliczyć indywidualne systemy oczyszczania ścieków, sytuowane na działkach prywatnych. Obowiązkowe jest jednak zgłoszenie budowy przydomowej oczyszczalni ścieków w Starostwie Powiatowym do którego należy obszar planowanej inwestycji. Dokumenty należy złożyć przed przystąpieniem do zaplanowanej inwestycji [26]. „Zgłoszenia należy dokonać przed terminem zamierzonego rozpoczęcia robót budowlanych. Organ administracji architektoniczno-budowlanej, w terminie 21 dni od dnia doręczenia zgłoszenia, może, w drodze decyzji, wnieść sprzeciw. Do wykonywania robót budowlanych można

przystąpić, jeżeli organ administracji architektoniczno-budowlanej nie wniósł sprzeciwu w tym terminie” – art. 30 ust. 5 Prawo budowlane [27]. Zgodnie z Ustawą o utrzymaniu czystości i porządku w gminach art. 5 ust. 1 pkt 2 „Przyłączenie nieruchomości do sieci kanalizacyjnej nie jest obowiązkowe, jeżeli nieruchomość jest wyposażona w przydomową oczyszczalnię ścieków spełniającą wymagania określone w przepisach odrębnych” [28].

Przydomowe oczyszczalnie ścieków usytuowane na terenach poza aglomeracją miejską, powinny zapewnić jakość odprowadzanych ścieków na poziomie przedstawionym w Załączniku nr 2 do Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych [25].

6. Zasady sytuowania hydrofitowych oczyszczalni ścieków

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2022 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, reguluje sposób umiejscowienia przydomowej oczyszczalni ścieków na działce w zabudowie jednorodzinnej. Zgodnie z art. 37 „Przepływowe, szczelne osadniki podziemne, stanowiące część przydomowej oczyszczalni ścieków gospodarczo-bytowych, służące do wstępnego ich oczyszczania, mogą być sytuowane w bezpośrednim sąsiedztwie budynków jednorodzinnych, pod warunkiem wyprowadzenia ich odpowietrzenia przez instalację kanalizacyjną co najmniej 0,6 m powyżej górnej krawędzi okien i drzwi zewnętrznych w tych budynkach” [29]. Pomiarów odległości dokonuje się od krawędzi pokrywy oraz kominków wentylacyjnych, zbiornika. W przypadku niespełnienia tego wymogu, odległość osadnika oraz podobnych urządzeń sanitarno-gospodarczych, o pojemności mniejszej niż 10 m³ od budynku, nie może być mniejsza niż 5 m. Ponadto odsunięcie tych obiektów od granicy działki, ciągu pieszego czy ulicy wynosi min. 2 m. Jeżeli działka sąsiednia wyposażona jest w podobne urządzenia sanitarno-gospodarcze, możliwe jest zachowanie odległości mniejszej niż 2 m. Studnie zaopatrujące w wodę muszą być usytuowane w odległości (mierzonej od osi studni) nie mniejszej niż 15 m w przypadku zbiorników na nieczystości oraz 30 m w przypadku drenów rozsączających przydomowych oczyszczalni ścieków, do których odprowadzane są ścieki oczyszczone biologicznie w stopniu niezagrożającym środowisku [29]. Tyczy się to również studni usytuowanych na działkach sąsiadujących. Oczyszczone ścieki odprowadzane przez system drenażowy, mogą zawierać niewielkie ilości fosforu oraz azotu. Substancje te wpływają na rozwój strefy korzeniowej roślin, co może doprowadzić do przedostawania się korzeni do systemu rozsączającego. Powoduje to kolmatację przewodów, czy też pogorszenie skuteczności rozsączania ścieków w gruncie. Zaleca się sytuować przydomowe oczyszczalnie ścieków w odległości min. 3 m od drzew, czy większych krzewów. Dodatkowo, odprowadzanie ścieków oczyszczonych, musi odbywać się w miejscu odizolowanym od najwyższego użytkowego poziomu wód podziemnych, warstwą gruntu o grubości nie mniejszej niż 1,5 m [26].

7. Rodzaje roślinności zasiedlającej systemy hydrofitowe

Rośliny hydrofitowe naturalnie porastają brzegi zbiorników wodnych oraz tereny podmokłe. Korzenie makrofitów rozrastają się w różnych kierunkach, dzięki czemu ścieki są równomiernie przesączane. Roślinność wodna odpowiada za stabilizowanie złóż oraz zabezpiecza je przez erozją wywołaną wiatrem. Dzięki rozbudowanej ryzosferze stwarzają optymalne siedlisko dla różnych gatunków mikroorganizmów, odpowiedzialnych za oczyszczanie ścieków.

Jedną z głównych zalet makrofitów jest zdolność do akumulacji pierwiastków biogennych oraz metali ciężkich. [6]. W systemach hydrofitowych zaleca się stosowanie gatunków roślin charakterystycznych dla terenów podmokłych, takich jak:

- *Phragmites australis* (pol. trzcina pospolita),
- *Typha* (pol. pałka),
- *Juncus* (pol. sSit),
- *Carex* (pol. turzycza),
- *Glyceria maxima* (pol. manna mielec),
- *Iris pseudocorus* (pol. kosaciec żółty),
- *Salix cinerea*, *Salix peuntandra* (pol. wierzy krzewiaste) [13].

W prawidłowym funkcjonowaniu oczyszczalni mogą pomóc odpowiednie biopreparaty stosowane są w celu wspomaganie rozkładu związków organicznych zawartych w ściekach dopływających do oczyszczalni hydrofitowych, eliminacji uciążliwych zapachów oraz polepszenia biodegradacji środków piorących. Zawierają one naturalne oraz wyselekcjonowane szczepy bakterii, drożdże, enzymy, jak również substancje pokarmowe. Stosowanie biopreparatów w przydomowych oczyszczalniach ścieków jest bezpieczne, gdyż wspierają one naturalne procesy oraz nie zawierają modyfikowanych mikroorganizmów [30]. Nie zaleca się natomiast stosowania w gospodarstwie domowym chemicznych preparatów (opartych na chlorze) służących do czyszczenia WC, trudno biodegradowalnych środków czystości czy wylewania do zlewu tłuszczów, ponieważ może to doprowadzić do zmniejszenia skuteczności oczyszczania czy zmniejszenia ilości bakterii obecnych w osadniku gnilnym [7].

8. Wnioski

1. Technologia oczyszczalni hydrofitowej jest prosta i składa się z dwóch głównych elementów, jakimi są – osadnik gnilny oraz złożo hydrofitowe. Dobór odpowiednich parametrów osadnika oraz odpowiedniej wielkości złoża, zapewnia oczyszczenie ścieków w stopniu niezagrażającym środowisku.
2. System hydrofitowy opiera się na wykorzystaniu naturalnych procesów oczyszczania zachodzących na terenach bagiennych, dzięki wykorzystaniu roślinności makrofitowej. Zdecydowanie jest jednym z najbardziej ekologicznych rozwiązań gospodarki ściekowej na terenach nieskanalizowanych, dobrze komponującym się z otaczającym krajobrazem.
3. Stosowane w systemie rośliny wodne, pełnią nie tylko rolę dekoracyjną, ale również wspomagają redukcję zanieczyszczeń obecnych w ściekach.
4. Metoda hydrofitowa pozwala również na zaadaptowanie istniejącego zbiornika wodnego, na odbiornik ścieków oczyszczonych.
5. Przydomowa oczyszczalnia hydrofitowa jest nie tylko łatwa w eksploatacji, ale i tania. Roczne koszty użytkowania takiej instalacji są niezaprzeczalnie niższe niż podłączenie i korzystanie z istniejącej sieci kanalizacyjnej.
6. Na terenach wiejskich budowa zbiorczej kanalizacji napotyka problemy społeczne oraz ekonomiczne co sprawia, że jej powstanie bywa niemożliwe. Dlatego też rozwiązanie problemu ścieków na tych obszarach może być wyeliminowane przy użyciu niekonwencjonalnych metod oczyszczania ścieków, jednym z nich są oczyszczalnie hydrofitowe

LITERATURA

- [1] Brzostowski N., Hawrylyszyn M., Karbowski D., Paniczo S. 2008. „Przydomowe oczyszczalnie ścieków poradnik”. Białystok: Podlaska Stacja Przyrodnicza „Narew”.
- [2] ElZein Z., Abdou A., Abd ElGawad I. 2016. „Constructed Wetlands as a Sustainable Wastewater Treatment Method in Communities. Procedia Environmental Sciences” (34): 605-617.
- [3] Fijałkowska A., Czaplicka M., Kurowski R. 2014. „Biologiczna redukcja siarczanów (VI) w ściekach z przemysłu metali nieżelaznych”. *Ochrona Środowiska* 36 (1):15-19.
- [4] Gajewska M. 2019. „Złoża hydrofitowe z pionowym przepływem ścieków charakterystyka procesów i zastosowań”. Polska Akademia Nauk.
- [5] Hadidi L.A. 2021. „Constructed Wetlands a Comprehensive Review. International Journal of Research – GRANTHAALAYAH” 9(8):395-417.
- [6] Heidrich Z., Stańko G. 2007. „Leksykon Przydomowych Oczyszczalni Ścieków”. Seidel – Przywecki.
- [7] https://aquatechnika.com.pl/poradnik/przydomowe-oczyszczalnie/biopreparaty-w-przydomowej-oczyszczalni-ściekow?srsltid=AfmBOoVbHltwzFCr5uKVrtf3gLV8nROSjilvb_5RYJ3DilsG_1-3tDW
- [8] <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/tablica>
- [9] <https://ekohouse-oczyszczalnie.pl/formalnosci-wymagane-do-budowy-przydomowej-oczyszczalni-ściekow-w-2024-roku>
- [10] <https://stat.gov.pl/wyszukiwarka/?query=tag:infrastruktura+komunalna>
- [11] <https://www.semanticscholar.org/paper/Removal-Mechanisms-in-Constructed-Wastewater-Norton/117f9c4e669d8779fe90a797190940702c-2c9a7d>
- [12] Jawecki B., Marszałek J., Paweńska K., Sobota M., Malczewska B. 2016. „Budowa i funkcjonowanie przydomowych oczyszczalni ścieków w świetle obowiązujących przepisów – część 2”. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* (II/2):569—580.
- [13] Kłodowska I. 2021. „Systemy hydrofitowe przyjazne środowisku”. Warminsko– Mazurski Ośrodek Doradztwa Rolniczego z siedzibą w Olsztynie.
- [14] Koc–Jurczyk J. 2013. „Mikrobiologiczne usuwanie metali ciężkich ze ścieków. Inżynieria Ekologiczna” (34): 166-172.
- [15] Lee Ch., Fletcher T., Sun G. 2009. „Nitrogen removal in constructed wetland systems”. *Engineering in Life Sciences* 9(1): 11 – 22.
- [16] Norton S. A. 2007. „Removal Mechanisms in Constructed Wastewater Wetlands”.
- [17] Obarska-Pempkowiak H. 2012. „Oczyszczalnia w ogrodzie : poradnik jak zastosować innowacyjne rozwiązania gospodarki ściekowej i osadowej z wykorzystaniem systemów hydrofitowych”. Seidel-Przywecki.
- [18] Obarska-Pempkowiak H., Wojciechowska E., Gajewska M. 2010. „Hydrofitowe Oczyszczanie Wód i Ścieków”. PWN.
- [19] Ojo A. P. 2021. „Simultaneous removal of organic matter and nitrogen in constructed wetlands: critical review”. *Universidade da Coruña. Faculdade de Ciencias*.
- [20] Omondi, D.O., Navalía, A.C. 2020. „CWs in wastewater treatment and challenges of emerging resistant genes filtration and reloading”. Devlin, A., Pan, J., & Manjur Shah, M. (Eds.). 2021. *Inland Waters – Dynamics and Ecology*. IntechOpen.
- [21] Ozimek T. 1988. „Rola makrofitów w krążeniu metali ciężkich w ekosystemach wodnych”. *Wiadomości Ekologiczne* (34): 31-44.
- [22] Pawlita-Posmyk M., Wzorek M. 2017. „Domestic sewage treatment plant or ecological septic tank”. *Technical Transactions* 5(114): 195-203.
- [23] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych (Dz. U. 2019 poz. 1311).
- [24] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2022 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022 poz. 1225).
- [25] Stefanakis A., Akratos S. Ch., Tsihrintzis A. V. 2014. „Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment”. *Elsevier Science*.
- [26] Ustawa o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz. U. 2022 poz. 1297).
- [27] Ustawa Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz. U. 2021 poz. 2351).
- [28] Ustawa Prawo Wodne z dnia 20 lipca 2017 r. (Dz.U. 2017 poz. 1566).
- [29] Vymazal J. 2007. „Removal of Nutrients in Various Types of Constructed Wetlands”. *Science of The Total Environment* 380 (1–3): 48–65.
- [30] Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R., Perfler R., Labler J. 1998. „Removal mechanisms and types of constructed wetlands”. *Backhuys Publisher*.
- [31] Waly M. M., Ahmed T., Abunada Z., Mickovski B. S., Thomson C. 2022. „Constructed Wetland for Sustainable and Low-Cost Wastewater Treatment: Review Article”. *Land* (9):1388.