

Ocena efektywności pracy wybranych systemów hydrofitowych

Evaluation of the effectiveness of selected constructed wetlands

Dorota Olejnik*, Milena Wolska, Krzysztof Wojciechowski

Institut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Politechnika Łódzka, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź,
e-mail: *dorota.olejnik@p.lodz.pl

Streszczenie

Systemy hydrofitowe mogą być wykorzystane do oczyszczania różnego rodzaju ścieków. Wykazują one wysoką efektywność zarówno przy usuwaniu związków biogenych jak i substancji ropopochodnych. Głównym celem pracy jest określenie efektywności usuwania zanieczyszczeń w hydrofitowych i gruntowo-roślinnych oczyszczalniach ścieków ze względu na rodzaj doprowadzanych ścieków. W pracy przedstawione są efekty oczyszczania dla ścieków komunalnych, deszczowych oraz przemysłowych.

Summary

Wetlands can be used for treatment a variety of different wastewaters. They exhibit a high efficiency in the removal of nutrients and petroleum substances. The main goal of this work is to determine the effectiveness of the removal of pollutants in constructed wetlands in different types of wastewater. In the article the results of treatment of municipal, urban, and industrial wastewater are presented.

Słowa kluczowe: oczyszczalnie hydrofitowe, oczyszczanie ścieków, ścieki komunalne, ścieki przemysłowe.

Key words: wetlands, wastewater treatment, municipal sewage, industrial wastewater.

1. Wstęp

Ilość oraz jakość zasobów wodnych ma zasadnicze znaczenie dla zdrowia ludności, a także dla wszystkich sektorów gospodarki. Poprawę jakości zasobów wodnych można uzyskać dzięki ograniczeniu wpływu ścieków komunalnych, przemysłowych oraz zanieczyszczeń rolniczych na wody powierzchniowe i podziemne. Istotnym aspektem jest oczyszczanie ścieków w miejscu ich powstawania na obszarach nieurbanizowanych [1]. Budowa zbiorczych kanalizacji nie zawsze jest możliwa ze względów społecznych i ekonomicznych. Dlatego też poszukiwanie racjonalnych metod oczyszczania ścieków i wód deszczowych jest jednym z najważniejszych wyzwań inżynierii środowiska. Jednym z niekonwencjonalnych sposobów oczyszczania są oczyszczalnie hydrofitowe określane jako ekosystemy bagienne, sztucznie tworzone w celu oczyszczania ścieków lub podczyszczania wód. W obiektach tych za proces oczyszczania odpowiedzialny jest złożony kompleks jakim jest woda, podłoże mineralne, obumarłe części roślin, żywe rośliny, duża liczba mikroorganizmów (bakterie, pierwotniaki, grzyby) oraz zwierzęta (bezkęgowce i kręgowce). Spotykane w literaturze nazewnictwo dla tego typu oczyszczalni to: oczyszczalnie hydrobotaniczne, roślinne lub glebowo-korzeniowe.

Systemy te wyróżnia doskonale wkomponowanie się w istniejące otoczenie, co podnosi jego walory estetyczne [2].

Obiekty hydrofitowe powstawały w Europie już od wczesnych lat 70 XX stulecia. Złóża roślinne stosowane są do oczyszczania różnego rodzaju ścieków, jednakże większość z nich została zaprojektowana do oczyszczania ścieków bytowych, pochodzących z jednostek o liczbie mieszkańców wynoszącej poniżej 500. Zdecydowana większość tego rodzaju obiektów obsługuje jednak niewielkie źródła zanieczyszczeń (do 50 mieszkańców), a także pojedyncze gospodarstwa domowe. Jedynie niewielka część oczyszczalni hydrofitowych jest przeznaczona do obsługi osiedli liczących powyżej 1000 mieszkańców [3]. Oczyszczalnie tego typu charakteryzują się niskimi kosztami eksploatacji, wysoką tolerancją na różnice w ilości i jakości dopływających ścieków, niewymagającą technologią oraz elastycznością w zastosowaniu i wizualnym wpasowaniu się w krajobraz. Oczyszczalnie hydrofitowe są systemami dynamicznymi, których struktura i kompozycja gatunkowa ewoluuje cyklicznie w ciągu sezonu i progresywnie wraz z ich wiekiem [4]. Oczyszczalnie roślinne zarówno w Europie i na świecie od wielu lat są bardzo popularną metodą oczyszczania ścieków, o czym świadczą liczne publikacje naukowe.

Istnieją jednak różne poglądy na temat efektywności działania tego typu obiektów, dlatego też ich skuteczność zostanie przeanalizowana w poniższej pracy.

Rodzaje systemów hydrofitowych.

Rodzaje stosowanych oczyszczalni roślinnych można podzielić ze względu na sposób w jaki przepływają przez nie ścieki oraz rodzaj stosowanej roślinności. Mogą być one budowane z podpowierzchniowym przepływem ścieków określane jako **VS** (Vegetated Submerged Beds) bądź **SSF** (Subsurface Flow Systems) oraz z powierzchniowym przepływem znane jako **FWS** (Free Water Surface) lub **SF** (Surface Flow). Wyróżnia się dwa rodzaje złożeń w systemie **VS** - z przepływem podpowierzchniowym poziomym - ścieki przepływają w kierunku poziomym kilka centymetrów pod powierzchnią złoża przez kompleks roślinno-gruntowy. Złoże wypełnione jest żwirem lub piaskiem o identycznej średnicy ziaren. Na wlocie i wylocie złoża stosuje się osypkę kamienną w celu równomiernego rozprowadzenia ścieków. W literaturze anglojęzycznej jest to typ oczyszczalni **HF-CW** (Horizontal Flow Constructed Wetland). Drugi typ to złoże z przepływem podpowierzchniowym pionowym - ścieki rozprowadzane są nad poletkiem, a następnie przepływają w kierunku pionowym i są zbierane drenażem na dnie złoża. Poletko nie jest zasilane w sposób ciągły. Stosuje się cykliczne napełnianie i opróżnianie ściekami. W złożu stosuje się warstwowe ułożenie materiału filtracyjnego, od najmniejszej średnicy do kamieni na dnie poletka. Jest to złoże typu **VF-CW** (Vertical Flow Constructed Wetland) [5].

2. Oczyszczanie ścieków deszczowych.

W Polsce ścieki deszczowe mogą być odprowadzane z powierzchni zanieczyszczonych do wód powierzchniowych i gruntu, jeżeli spełniają warunki określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [6]. Ścieki opadowe odróżniają się od innych rodzajów ścieków tym, iż są one uzależnione od intensywności i częstości występowania opadów, co wpływa na ich różnorodny skład i ilość. Na różnorodny ładunek zanieczyszczeń w wodach opadowych, a także stężenie ma wpływ charakter danej zlewni. Charakter zlewni uzależniony jest od występujących w niej ilości terenów zielonych, typu nawierzchni terenów utwardzonych, urbanizacji, a także sposobu oczyszczania ulic. Ilość zanieczyszczeń jest przede wszystkim duża w czasie trwania intensywnych opadów, podczas trwania pierwszej fazy spływu, a także gdy opad występuje po długim okresie suszy [7]. Ścieki deszczowe mogą być zanieczyszczone

poprzez nieczystości uliczne, tj. niedopałki, papierki, szczątki roślin, resztki jedzenia, wycieki olejów, starte cząstki opon samochodowych i nawierzchni dróg, środki chemiczne i mineralne używane do usuwania oblodzenia z dróg i wiele innych. W ściekach takich mogą znajdować się metale ciężkie, których źródłem są procesy spalania paliw np. oleju napędowego i skroplonych węglowodorów oraz zanieczyszczenia emitowane do powietrza atmosferycznego przez przemysł [8].

Ścieki deszczowe oczyszczane są głównie za pomocą separatorów, których głównym celem jest usuwanie zanieczyszczeń łatwo opadających i substancji ropopochodnych. Urządzenia te wymagają jednak specjalistycznej obsługi i konserwacji. Oczyszczalnie roślinne mogą zastąpić separatory w oczyszczaniu ścieków deszczowych, bądź mogą być ich uzupełnieniem w celu poprawienia efektywności pracy. Niewątpliwą zaletą jest również to, iż systemy te mogą być stosowane w miejscu powstawania ścieków (np. przy spływach z autostrad) jeśli pozwala na to dostępność terenu [9].

2.1. Oczyszczalnia hydrofitowa ścieków pochodzących z zlewni miejskiej na Potoku Swelina w Sopocie.

Na Potoku Swelina w Sopocie w roku 1994 wybudowano oczyszczalnię hydrofitową, służącą do oczyszczania ścieków pochodzących ze zlewni miejskiej. Dzięki temu możliwe było ponowne korzystanie z kąpieliska zamkniętego z powodu pozaklasowości wód odprowadzanych do Zatoki Gdańskiej. Oczyszczalnia składa się ze zbiornika sedymentacyjno-retencyjnego o pojemności 500 m³ (głębokość ok. 1m), a także wegetacyjnego filtra piaskowego którego pojemność wynosi 870 m³ i miąższości warstwy czynnej 1m (czas zatrzymania wynosi 2 godziny dla przepływu obliczeniowego 30 dm³/s). Filtr wegetacyjny obsadzony został trzciną pospolitą, natomiast wypełnienie złoża składa się ze żwiru. Oczyszczona woda zbierana jest drenażem rurowym, a następnie odprowadzana jest do studni kontrolnej, skąd kierowana jest bezpośrednio do wód potoku. W trakcie trwania intensywnych opadów deszczu pierwsza fala spływu, która jest najbardziej zanieczyszczona, zatrzymywana zostaje w zbiorniku retencyjnym, a nadmiar wód dociera bezpośrednio przelewem do potoku. Obiekt ten pełni głównie funkcję usuwania z wód związków biogenych (fosforanów), jak również zanieczyszczeń mikrobiologicznych pochodzenia fekalnego, docierających z wodami opadowymi [10]. Wybudowanie oczyszczalni hydrobotanicznej znacznie przyczyniło się do poprawy jakości wód potoku, podczas trwania trzyletniego monitoringu obiektu, ogólna liczba próbek zaliczanych do I klasy czystości wzrosła do 75% wszystkich

pobrane próbek, zarówno pod względem kryteriów chemicznych, jak i mikrobiologicznych. Działania te pozwoliły na powtórne udostępnienie plaży i kąpieliska do użytkowania publicznego [9].

2.2 Usuwanie zanieczyszczeń pochodzących z Miejskiego Ogrodu Zoologicznego w Oliwie.

W Miejskim Ogródzie Zoologicznym w Oliwie został wybudowany zespół obiektów hydrotechniczno-hydrofitowych, służący głównie do usuwania zanieczyszczeń z terenów wybiegu dla zwierząt. Obiekt ten ma za zadanie ograniczenie odpływu zanieczyszczeń z terenu ZOO do Potoku Rynaszewskiego. Były to głównie: wysokie stężenie azotu ogólnego, a także w mniejszym stopniu, zanieczyszczenia mikrobiologiczne, tj. bakterie *coli* typu fekalnego, które znacząco obniżały klasę jakości tych wód.

Zespół obiektów hydrotechniczno-hydrofitowych na terenie Miejskiego Ogrodu Zoologicznego w Oliwie składa się z filtrów piaskowych i wegetacyjnych, wylewiska tzn. systemu hydrofitowego z powierzchniowym przepływem wody o powierzchni 3100 m², a także z pięciu stref buforowych o całkowitej powierzchni 6650 m² [9]. Strefy buforowe usytuowane zostały na obrzeżach stawów oraz wzdłuż koryta potoku. Ich celem jest usuwanie zanieczyszczeń z wybiegów i pomieszczeń dla zwierząt. Zostały one obsadzone wierzbą wiciową (*Salix viminalis*). Aby zapewnić większą retencję wód opadowych, strefy buforowe poprzecinano bruzdami i przeciwstokami równoległymi do nurtu [9]. W Tabeli nr 1 przedstawiono średni roczny ładunek zanieczyszczeń odprowadzany z Potoku Rynaszewskiego przed wybudowaniem obiektu (1991 r.) i po 15 latach eksploatacji (2006 r.).

Tabela 1. Ładunki zanieczyszczeń przed i po założeniu stref buforowych wzdłuż koryta i jego dopływów [11].

Punkt poboru wody	Ładunek [kg/d]											
	N _{og}		N-NH ₄ ⁺		N _{org}		PO ₄ ³⁻		BZT ₅		ChZT _{Mn}	
	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po
Przed Dużym Stawem	4,4	1,3	0,4	0,1	3,0	1,0	0,7	0,1	1,6	2,0	10,4	3,8
Za Małym Stawem - poniżej strefy buforowej	24,0	6,5	0,7	0,5	22,1	5,1	5,7	0,7	-	9,4	21,8	11,6
Za Stawem Ovalnym	34,8	10,5	6,3	0,8	21,6	7,4	1,1	1,1	17,9	16,3	49,5	19,5
Za Stawem Hipopotamów	46,4	4,7	11,6	0,8	23,7	2,1	3,2	0,5	12,7	9,5	24,2	2,1

Tabela 2. Stężenia metali toksycznych w wodzie opadowej przy autostradzie [12].

Pierwiastek	Stężenie w wodzie pochodzącej z tunelu i autostrady, [µg/l]	Stężenie w wodzie oczyszczonej w systemie hydrofitowym, [µg/l]	Redukcja [%]
Mo	25,1	8,3	66,9
Cr	30,2	11,4	62,2
Ni	36,3	29,9	17,6
Pb	39,0	19,0	51,3
Cu	238,0	39,1	83,6
Zn	273,0	208,0	23,8
Al	4060,0	1200,0	70,4
Fe	6760,0	1760,0	73,9

Jak wynika z Tabeli 1 nastąpiło kilkukrotne zmniejszenie ładunków zanieczyszczeń do Potoku Rynaszewskiego, szczególnie azotu ogólnego.

2.3. Oczyszczanie ścieków deszczowych z autostrady i tunelu w Norwegii.

W Norwegii czyszczenie tuneli drogowych odbywa się od 2 do 12 razy w ciągu roku, jest to zależne od rodzaju tunelu i częstotliwości natężenia ruchu. Podczas mycia tunelu zużywane jest od 40 - 80 m³/km wody. W wodzie użytej do mycia tuneli znajdują się zanieczyszczenia, pochodzące m.in. z cząstek spalin, ze ścierania powierzchni drogi czy zużycia pojazdów drogowych. Ścieki te zawierają w swoim składzie metale ciężkie i są oczyszczane za pomocą dwustopniowego systemu stawów zlokalizowanych w pobliżu tunelu lub drogi szybkiego ruchu.

Oczyszczanie ścieków opadowy w dwustopniowym systemie stawów przyniosło znaczne redukcje zanieczyszczeń. Jedynie w przypadku stężeń niklu i cynku ich redukcja była stosunkowo niska w porównaniu z pozostałymi pierwiastkami (Tabela 2). Badania te pokazały skuteczność tej metody w usuwaniu substancji toksycznych. Może ona z powodzeniem stać się standardem w państwach posiadających problem z oczyszczaniem ścieków deszczowych oraz wód pochodzących z mycia autostrad czy tuneli [12].

3. Oczyszczanie ścieków komunalnych.

Na terenie Polski istnieje wiele miejsc w których nie ma instalacji kanalizacyjnej. W dużej mierze są to obszary wiejskie o rozproszonej zabudowie, a także tereny górskie i podgórskie o cennych walorach krajobrazowych. Na takich terenach do oczyszczania ścieków komunalnych coraz częściej wykorzystywane są oczyszczalnie roślinne, ponieważ doskonale wkomponowują się w otaczający krajobraz. Oczyszczalnie te mogą być również stosowane w przypadku budynków użytkowanych sezonowo albo o bardzo dużych różnicach ilości ścieków. Obiekty hydrofitowe z powodzeniem mogą być wykorzystywane do doczyszczania ścieków wypływających z oczyszczalni konwencjonalnych, aby uzyskać poprawę wskaźników fizyko-chemicznych oraz podnieść efektywności procesów oczyszczania ścieków komunalnych

3.1. Przydomowe oczyszczalnie na terenach cennych krajobrazowo.

Obiektem analizy efektywności pracy przydomowych oczyszczalni roślinnych na terenach cennych krajobrazowo są dwie oczyszczalnie usytuowane na terenie gminy Bystrzyca Kłodzka w miejscowościach Szklarka oraz Paszków. Obie te oczyszczalnie są dwustopniowymi obiektami mechaniczno-

biologicznymi. Składają się one z osadnika gnilnego oraz złóż gruntowo-roślinnych. W oczyszczalni w Szklarce oczyszczane ścieki pochodzą z przyległych budynków mieszkalnych, natomiast oczyszczalnia w Paszkowie oczyszcza ścieki z ośrodka wypoczynkowego. Złóża w tych oczyszczalniach pracują w układzie szeregowo-równoległym. Wybrane parametry analizowanych oczyszczalni przedstawione zostały w Tabeli 3 [13].

W badaniach analizowany był skład fizyko-chemiczny ścieków po procesie wstępnego mechanicznego oczyszczania zachodzącym w osadniku gnilnym oraz ścieków oczyszczonych odprowadzanych do odbiornika. Badania przeprowadzone były w latach 2008 i 2010. W Szklarce średnie wartości w odpływie ścieków wynosiły odpowiednio dla BZT₅ 0,2 - 0,4 mgO₂/dm³, dla ChZT 17,7 - 36,8 mgO₂/dm³, zawiesiny ogólne 15,2 - 31,1 mg/dm³, dla azotu ogólnego 5,7 - 13,3 mgN/m³, fosforu ogólnego 0,6 - 2,2 mgP/dm³. Wartości te nie przekraczały dopuszczalnych wartości określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [6] W Paszkowie natomiast osiągnięte zostały następujące wartości w odpływie ścieków dla BZT₅ 1,7 - 6,7 mgO₂/dm³, dla ChZT 50,7 - 230,0 mgO₂/dm³, zawiesiny ogólne 73,3 - 128,0 mg/dm³, dla azotu ogólnego 16,0 - 45,0 mgN/m³, fosforu ogólnego 2,4 - 7,9 mgP/dm³. Obiekt ten znacząco przekroczył wartości dopuszczalne dla zawiesiny ogólnej w odpływie. Przekroczenie wartości unormowanych w rozporządzeniu nastąpiło również w przypadku ChZT oraz związków biogenych. Problemy efektywności tej oczyszczalni mogły być związane ze zmiennością i dużą nierównomiernością w dopływach ścieków dostarczanych do złoża ze względu na sezonową pracę ośrodka wypoczynkowego [13]. W Tabeli 4 przedstawione zostały roczne efektywności pracy obu oczyszczalni znajdujących się na terenach górskich. Na podstawie danych efektywności pracy oczyszczalni wywnioskować można, iż pracowały one stabilnie przez cały badany okres. W oczyszczalni zlokalizowanej w Paszkowie efektywności pracy w 2008 i 2010 roku cechują się większą rozbieżnością, w porównaniu z oczyszczalnią w Szklarce. Tylko dla BZT₅ efektywność w obu oczyszczalniach na przełomie dwóch lat nieznacznie się od siebie różniła. Ogólna redukcja BZT₅ dla obu oczyszczalni była dość wysoka i kształtowała się na poziomie 90%. Dla ChZT efektywność była powyżej 70%. Na podobnym poziomie kształtowała się efektywność usuwania azotu ogólnego przez oczyszczalnie i wynosiła ponad 61%. Oczyszczalnia w Szklarce charakteryzowała się wyższą efektywnością pracy, m.in. podczas usuwania fosforu ogólnego oraz zawiesiny ogólnej.

Tabela 3. Parametry złóż gruntowo-roślinnych w Szklarcie i Paszkowie [13].

Parametry złóż	Miejscowość	
	Szklarka	Paszków
Oczyszczanie mechaniczne	Osadnik gnilny	
Maksymalna przepustowość [m^3/d]	13	11
Liczba mieszkańców	59	22
Liczba złóż	2	4
Powierzchnia [m^2]	396	215
Głębokość złoża [m]	0,8	0,6
Rodzaj wypełnienia	Gлина piaszczysta z dodatkami	Żwir
Nasadzenie	Trzcina pospolita	

Tabela 4. Średnia sprawność oczyszczalni hydrofitowych na terenie gminy Bystrzyca Kłodzka [13].

Parametr	Obiekt w Szklarcie		Obiekt w Paszkowie	
	2008	2010	2008	2010
Zawiesiny ogólne [mg/dm^3]	77,5	77,7	21,8	66,0
BZT ₅ [mgO_2/dm^3]	91,0	90,5	97,8	97,7
ChZT _{Cr} [mg/dm^3]	81,4	81,5	72,3	86,9
Azot ogólny [mg/dm^3]	65,9	67,0	69,8	61,0
Fosfor ogólny [mg/dm^3]	72,9	63,9	59,2	56,0

3.2. Przydomowa oczyszczalnia obsługująca jedno gospodarstwo domowe.

Miejscem analizy efektywności przydomowej roślinnej oczyszczalni ścieków jest Przyborów (woj. lubuskie). Oczyszczalnia ta została wybudowana w 1996 r. i pracuje w układzie z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków typu VF-CW. Oczyszczalnia ta obsługuje jeden budynek mieszkalny o średnim dobowym przepływie ścieków równym $Q_{d, sr} = 0,8 \text{ m}^3/\text{d}$. Gromadzone w osadniku osady wywożone są do gminnej oczyszczalni ścieków raz na 5 lat. Złoże VF-CW ma wysokość 1,0 m i odizolowane jest od podłoża geomembraną. Składa się ono z 3 warstw: żwiru ($d = 4\text{-}32 \text{ mm}$), piasku średniego ($d = 0,5\text{-}2 \text{ mm}$) oraz z mieszanki kory drzewnej, trocin i zrębków drzewnych. Złoże obsadzone jest roślinnością makrofitową, tj. manną mielec (*Glyceria maxima*) i turzycą sztywną (*Carex elata*). Staw doczyszczający zagłębiono na głębokość 0,7 m oraz częściowo odizolowano od podłoża geomembraną i obsadzono pałąką wąskolistną (*Typha angustifolia*) i pałąką szerokolistną (*Typha latifolia*) [5]. Badania nad efektywnością pracy przydomowej oczyszczalni roślinnej w Przyborowie zostały wykonane po 15 latach eksploatacji złoża. Miały one na celu pokazanie skuteczności pracy oczyszczalni w zakresie usuwania zanieczyszczeń organicznych, a także związków biogenych. Prace badawcze wykonane zostały

w trzech różnych okresach czasowych, w celu określenia wpływu temperatury powietrza na efektywności pracy złoża hydrofitowego. Próbkę ścieków pobrano w porze późnojesiennej (grudzień 2011), w której średnia temperatura powietrza wynosiła około 5°C , zimą (luty 2012), przy temperaturze powietrza ok -5°C , po wystąpieniu kilkutygodniowych temperatur poniżej -18°C oraz w czerwcu 2012 r., przy temperaturach powietrza dochodzących do 20°C . W celu określenia efektywności pracy złoża, próbki pobierane były w dwóch miejscach: w przepompowni zlokalizowanej przed dopływem ścieków do złoża hydrofitowego, a także w stawie doczyszczającym [5]. Wyniki badań przedstawione na Wykresie 1 ilustrują wysoką efektywność pracy złoża roślinnego zarówno przy dodatnich jak i ujemnych temperaturach powietrza. Rezultaty badań potwierdzają prawidłową pracę oczyszczalni zarówno w zakresie usuwania zanieczyszczeń organicznych, jak i związków biogenych. Średnia redukcja związków organicznych wyrażonych w BZT₅ i ChZT_{Cr} wynosiła 94% dla BZT₅, natomiast dla ChZT_{Cr} 91%. Wysokie obniżenie stężenia azotu amonowego wynoszące od 80 do 91% wskazuje na prawidłowo przebiegający proces nityfikacji w analizowanej oczyszczalni. Natomiast azot całkowity usuwany był ze zmienną efektywnością wahającą się od 30 do 83%. Fosforany usuwane były ze ścieków z większą efektywnością w lutym oraz w czerwcu

i kształtowała się ona na poziomie 85-91%. Podobną zależność zauważyć można w przypadku usuwania fosforu ogólnego, którego efektywność w okresie późnojesiennym wynosi 55%, natomiast w lutym i w czerwcu jest wyższa o około 30%.

4. Oczyszczalnie hydrofitowe stosowane w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków.

W Skandynawii, a w szczególności w Szwecji, sztuczne mokradła bardzo często wykorzystywane są w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków jako końcowy etap obróbki ścieków. Powodem stosowania takiego rozwiązania są przede wszystkim poprawa jakości wypływających ścieków, polepszenie ekologicznego wizerunku oczyszczalni, zredukowanie negatywnego wpływu na środowisko oraz polepszenie lokalnej estetyki i bioróżnorodności [15].

Oczyszczalnie z powierzchniowym przepływem ścieków (FWS) stosowane są w III stopniu oczyszczania ścieków w m.in. w Ameryce Północnej. Obiekty te charakteryzują się dużą efektywnością w usuwaniu zanieczyszczeń.

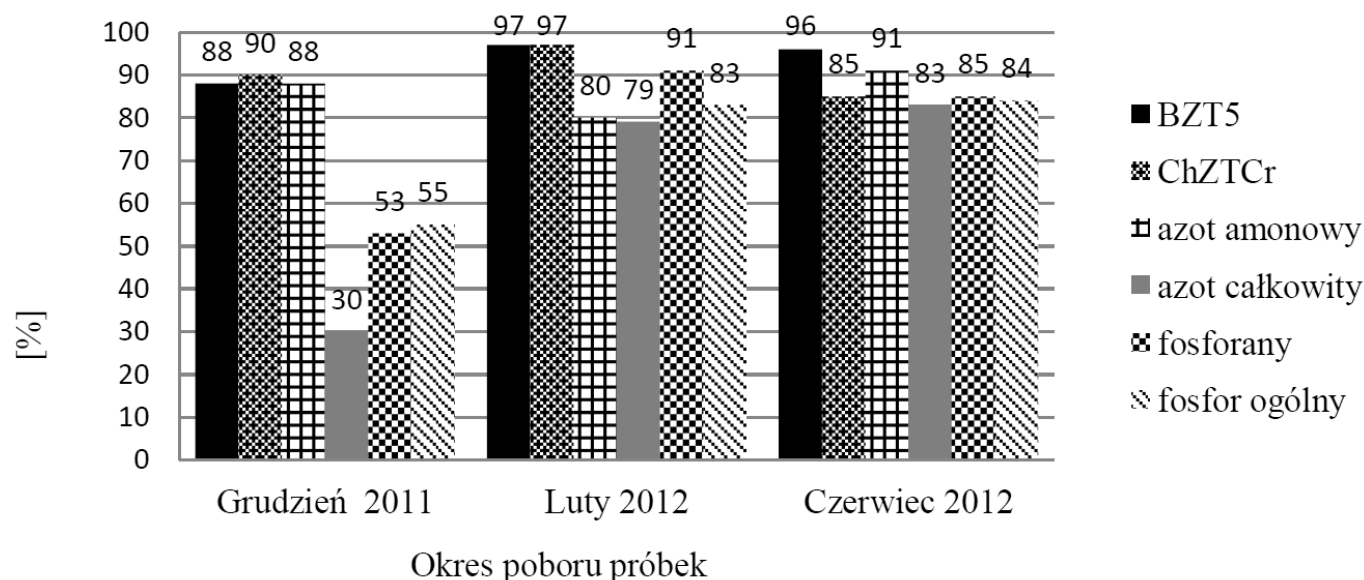
Głównym celem stosowania złoża roślinnego z powierzchniowym przepływem ścieków w III stopniu oczyszczania jest zmniejszenie stężenia związków fosforu, a także zapewnienie warunków anaerobowych w celu przeprowadzenia procesu nityfikacji. W Pamlico City (USA) oczyszczalnia tego rodzaju osiągnęła skuteczność usuwania azotu ogólnego na

poziomie 64,1% (z 44,4 do 16,0 mg/dm³). Redukcja ta możliwa była dzięki procesowi nityfikacji i akumulacji związków w biomase roślin oraz dyfuzji do atmosfery i rozcieńczenia ścieków wodami opadowymi. Natomiast stężenie fosforu zmalało z 4,4 do 0,6 mg/dm³. Nastąpiło to poprzez przejście ścieków przez naturalny ekosystem bagienny [11].

Złóża z podpowierzchniowym przepływem ścieków (VSB) uznane zostały w Wielkiej Brytanii za najlepsze rozwiązanie do oczyszczania III stopnia ścieków, często wykorzystywane w miejscowościach do 3000 mieszkańców. Obiekty te sprawnie funkcjonują dla powierzchni jednostkowej wynoszącej 0,7 m²/M przez okres 20 lat, po którym konieczna jest wymiana żwiru. Złóża te cechują się ok. 70% efektywnością w usuwaniu azotu ogólnego oraz ok. 40% skutecznością usuwania fosforu [11].

5. Oczyszczanie ścieków przemysłowych.

Oczyszczalnie hydrofitowe cieszą się coraz większym zainteresowaniem przy oczyszczaniu ścieków przemysłowych. Wiedza na temat oczyszczania tego rodzaju ścieków w oczyszczalniach roślinnych jest jednak jeszcze niedostatecznie poznana. Ścieki pochodzące z różnych gałęzi przemysłu charakteryzują się odmiennym składem, co może stanowić potencjalne zagrożenie w obniżeniu efektywności pracy takiej oczyszczalni.



Wykres 1. Efektywność pracy oczyszczalni w Przyborowie [14].

Jednakże wiele gałęzi przemysłu decyduje się na oczyszczanie ścieków w oczyszczalniach hydrofitowych, zwracając szczególną uwagę na dobór technologii i roślin, dostosowanych do usunięcia poszczególnych zanieczyszczeń pochodzących z danego zakładu przemysłowego. Istotnym elementem w projektowaniu takiej oczyszczalni jest dostosowanie się do przykładowych warunków terenowych oraz zastosowanie takich gatunków roślin, które będą tolerowały różne chemikalia przemysłowe.

5.1. Usuwanie zanieczyszczeń z przemysłu farmaceutycznego.

Środki farmaceutyczne, leki i produkty do pielęgnacji ciała stają się coraz większym zagrożeniem dla gospodarki wodnej z powodu ich coraz większego zastosowania. Obecność leków w środowisku wodnym może mieć niekorzystny wpływ na organizmy żyjące w środowisku wodnym i lądowym, powodować spadek różnorodności glonów oraz uodpornienie organizmów na środki przeciwbakteryjne. Oczyszczanie tego rodzaju ścieków w sposób konwencjonalny jest nieoptyczne, dlatego też przeprowadzono badania dla alternatywnej metody oczyszczania czyli dla oczyszczalni roślinnych. Badania te wykazały, że skuteczność usuwania środków farmaceutycznych w oczyszczalniach hydrofitowych jest porównywalna do oczyszczalni konwencjonalnych [16]. Z przeprowadzonych badań wynika, że trzcina pospolita (*Phragmites australis*) była bardziej efektywna niż pałka wodna (*Typha angustifolia*) w usuwaniu związków pochodzenia farmaceutycznego m.in. ibuprofenu, diklofenaku i kofeiny. Rośliny te różniły się też ilością substancji magazynowanej w korzeniach. Jednakże różnice w usuwaniu związków farmaceutycznym przez różne rodzaje makrolitów nie zostały jeszcze dostatecznie zbadane i udowodnione. Ponadto jest wiele uogólnień dotyczących zdolności akumulacji przez rośliny substancji pochodzenia farmaceutycznego, co przyczynia się do ograniczonych możliwości właściwego doboru tych roślin do oczyszczania tego rodzaju ścieków. Ważny elementem jest rodzaj gleby znajdującej się na terenie oczyszczalni roślinnej. Przeprowadzone badania wykazały, że większa wydajność usuwania zanieczyszczeń wystąpiła na piaszczystych niż na gliniastych glebach. Piaszczysta gleba ułatwia ruch wody w obrębie jej profilu, powodując lepszą możliwość oddziaływania zanieczyszczeń na glebę i ich większe usuwanie poprzez mechanizm sorpcji i degradacji mikrobiologicznej. Efektywność usuwania ze ścieków związków takich jak: kwas salicylowy, ibuprofen, naproksen, diklofenak i kofeina wynosiły odpowiednio dla złoża typu **VF-CW** 98%, 99%, 89% 73% i 99% oraz dla złoża typu **HF-CW** 96%, 71%, 85%, 15% i 97% [17]. W złożach z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków zaobserwowano

wyższy potencjał biodegradacji niż w złożu z podpowierzchniowym poziomym przepływem. Jest to skutkiem lepszego natlenienia złoża, które przyczynia się do wzrostu liczby mikroorganizmów odpowiedzialnych za procesy biodegradacji.

5.2. Oczyszczanie ścieków barwnych.

Ścieki barwne emitowane są do ścieków głównie z przemysłu włókienniczego, farbiarskiego, kosmetycznego i papierniczego. Występujące w tych ściekach barwniki to złożone cząsteczki organiczne i metaloorganiczne, zawierające pierścienie aromatyczne oraz ugrupowania m.in. azowe, nitrowe, disiarczkowe, odporne na rozkład w wyniku stosowania metod fizycznych, chemicznych lub biologicznych. Ponadto w wyniku ich rozkładu mogą powstawać niewielkie ilości produktów toksycznych lub kancerogennych. Dlatego też do ich usuwania ze ścieków, wskazane jest stosowanie, a często nawet konieczne, łączenie wielu metod takich jak biodegradacja, koagulacja, sorpcja, utlenianie i filtracja [18]. Idealne warunki do rozkładu barwników znajdują się w oczyszczalniach hydrofitowych, ponieważ stanowią one połączenie stref tlenowych i beztlenowych [19].

Oczyszczanie ścieków barwnych za pomocą oczyszczalni roślinnych nie zostało jeszcze dostatecznie zbadane, o czym świadczyć może niewielka ilość literatury dotyczącej tego tematu. Jednak zaprezentowane w Tabeli 5 wyniki badań świadczą o wysokiej skuteczności systemów hydrofitowych w rozkładzie ścieków barwnikarskich. Z badań przeprowadzonych nad skutecznością usuwania barwników ze ścieków wywnioskowano, iż efektywność usuwania substancji organicznych, amin aromatycznych oraz azotu amonowego jest znacznie większa w złożach napowietrzanych niż nienapowietrzanych. Ponadto stwierdzono, że złoża obsadzone trzcina pospolita są w stanie rozłożyć stosowany w badaniach barwnik azowy AO7 (Oranż kwasowy II, Acid Orange 7, C.I 15510), ale także powstające w wyniku jego rozkładu aminy aromatyczne. Zauważono również, że zwiększenie stężenia AO7 w podawanych ściekach obniża efektywność biodegradacji substancji organicznych oraz nityfikacji w złożach nienapowietrzanych. Natomiast z złożach napowietrzanych powoduje obniżenie efektywności denityfikacji i odbarwienia ścieków. W złożach zasilanych roztworem barwnika azowego AO7 zauważono, iż obecność danego barwnika oraz produktów jego rozkładu (amin aromatycznych) może mieć hamujący wpływ na aktywność drobnoustrojów denityfikacyjnych i nityfikacyjnych [19].

W Polsce przeprowadzono badania nad rozkładem barwników kwasowych w ściekach na modelowych

hydrofitowych oczyszczalniach wazonowych w okresie od maja do września 2010 r. Badania przeprowadzono na równoległe pracujących modelach zawierających złoża obsadzone manną mielec i kosaćcem żółtym oraz kontrolne złoża bez roślin. Wazony, w których przeprowadzano badania składały się z czarnych nieprzezroczystych pojemników wykonanych z tworzywa sztucznego o pojemności 20l. W pojemnikach umieszczono kosze do nasadzenia roślin wodnych, które wypełnione zostały 1 kg płukanego żwiru rzeczno oraz zasilane były ściekami zawierającymi substancje barwne. W trzech złożach posadzono mannę mielec, jak również w trzech kosaćca żółtego. Do badań użyto barwnik AO7 w stężeniach 0,29 i 1,71 mol/l, porównywalnych do stężeń zastosowanych w badaniach przedstawionych w Tabeli 5. Po 30 dniach badań stwierdzono, iż roztwory modelowe odbarwiły się w 100%. Nie zauważono także negatywnego wpływu AO7 na wzrost stosowanych w badaniach roślin. Potwierdzono, że możliwe jest odbarwienie roztworów zawierających barwnik kwasowy Acid Orange 7 bez zahamowania rozwoju wykorzystywanych roślin. Na podstawie przeprowadzonych badań i danych literaturowych wywnioskować można, że stopień usunięcia barwników w oczyszczalniach roślinnych 4 **VH-CW** (system złożony z 2 złóż **VF-CW** i jednego złoża **HF-CW**) jest wysoki i mieści się w granicach od 70 do 98% [20].

5.3. Oczyszczanie ścieków z winiarni.

W czasie produkcji wina powstają ścieki z przetwarzania winogron oraz butelkowania i mycia pojemników. Ścieki z winiarni charakteryzują się wahaniami w zakresie ilości i jakości przez cały rok. Jest to zależne od wielu czynników, takich jak przyjęty proces produkcji wina, rodzaju owoców czy sezonowość. Średnio przy produkcji 1l wina wytwarzane jest ok 1,6 - 2,0l ścieków. W skład tych ścieków wchodzi m.in. cukry, alkohole, kwasy, garbniki, różne ilości zawiesin. Stężenie związków azotu w ściekach pochodzących z winiarni wynosi średnio 8 mg/l - 35 mg/l, a fosforu 2 mg/l do 20 mg/l. Natomiast pH tych ścieków waha się od 3,5 do 7. Konwencjonalne oczyszczalnie nie są skuteczne dla tego rodzaju przemysłu ze względu na sezonową zmienność przepływów ścieków uzależnioną od okresu pracy, a także owoców (białe, czerwone) [21].

W Tabeli 6 zostały przedstawione przykłady winnic z których ścieki oczyszczane są w oczyszczalniach roślinnych. W większości tych oczyszczalni zastosowany został podpowierzchniowy poziomy przepływ ścieków. Ścieki wytwarzane z małych oraz średnich winnic nie były poddawane wstępnej obróbce. Były one bezpośrednio kierowane do oczyszczalni hydrofitowych. Bezpośrednie kierowanie ścieków o wysokim stężeniu związków organicznych do

oczyszczalni może nieść za sobą konsekwencje takie jak zatykanie, które zmniejsza infiltrację w złożu i może przyczynić się do jego uszkodzenia. Zatykanie złoża może występować w złożach z poziomym, jak i z pionowym przepływem ścieków. W celu uniknięcia zatykania złóż oczyszczalni hydrofitowych stosowano urządzenia służące do podczyszczania ścieków. Ścieki podczyszczane były np. w zbiornikach Imhoffa, stawach osadowych czy filtrach z piasku gruboziarnistego. Efektywność pracy w analizowanych oczyszczalniach jest dość wysoka. Jak wynika z Tabeli 7 na efektywność pracy oczyszczalni wpływ mają obciążenie hydrauliczne oraz zawarte w ściekach substancje organiczne. Im większa jest ilość związków organicznych w ściekach tym mniejsza jest efektywność oczyszczalni, która może być spowodowana np. zatykaniem złoża przez substancje organiczne. Oczyszczanie ścieków z winnicy wymaga również dużej powierzchni działki.

5.4. Oczyszczanie ścieków z przemysłu rafineryjnego.

Ilość ścieków z obiektów przeznaczonych do dystrybucji i sprzedaży paliw płynnych rośnie proporcjonalnie do wzrostu ilości pojazdów na naszych drogach. Wykluczone jest bezpośrednie odprowadzanie ścieków do kanalizacji komunalnej ponieważ posiadają one w swoim składzie liczne substancje ropopochodne. Według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. [6], ścieki pochodzące z przemysłu rafineryjnego powinny być wstępnie podczyszczone przed odprowadzeniem ich do kanalizacji. W celu wstępnego oczyszczania ścieków ze stacji paliw, zamiast separatorów substancji ropopochodnych, mogą być stosowane oczyszczalnie hydrofitowe. Oczyszczalnie tego typu dostosowane są do specyficznych warunków panujących na danej stacji i nawet w przypadku obiektów posiadających bardzo ograniczoną ilość wolnej przestrzeni (np. położonych w miastach o gęstej zabudowie) można stosować oczyszczalnie szklarniowe, które doskonale wkomponują się w otaczający je krajobraz. [15] Związki ropopochodne znajdujące się w ściekach rafineryjnych są szkodliwe dla zdrowia i życia ludzi, jak i środowiska naturalnego. Dopuszczalne stężenie węglowodorów alifatycznych w ściekach nie powinno przekraczać 5 mg/dm³ dla rafinerii ropy naftowej oraz 15 mg/dm³ dla pozostałych rodzajów ścieków. Wartości te odnoszą się zarówno do ścieków odprowadzanych do środowiska, jak i do zbiorczych systemów kanalizacji komunalnej. Dlatego też konieczne jest oczyszczanie ścieków ze skutecznym usunięciem z nich substancji ropopochodnych. [22].

Oczyszczalnie roślinne z powodzeniem stosowane są w większości zakładów rafineryjnych w Stanach Zjednoczonych, Chinach i na Węgrzech.

Tabela 5. Przykłady wykorzystania oczyszczalni hydrofitowych do rozkładu barwników/ścieków barwnikarskich [20].

Typ złoża, kraj	Rodzaj roślin	Barwnik	Stopień usunięcia
VF-CW, Słowenia	Trzcina pospolita	Modelowe ścieki symulujące wypływ z fabryki włókienniczej	70%
VH-CW ¹ , Słowenia	Trzcina pospolita	Ścieki rzeczywiste z fabryki włókienniczej	90%
VF-CW, Portugalia	Trzcina pospolita	Oranż Kwasowy II (C.I 15510)	70%
UF-CW, Japonia	Trzcina pospolita	Oranż Kwasowy II (C.I 15510)	96-98%
FWS, Tanzania	Trzcina pospolita	Modelowe ścieki symulujące typowe dla fabryk włókienniczych w Tanzanii	72%
	Kolokazja jadalna		77%

Tabela 6. Występowanie na świecie oczyszczalni hydrofitowych w winnicach [21].

Miejsce	Przepływ	Obróbka wstępna	Typ oczyszczalni i powierzchnia [m ²]
Hopland, California	0,50 m ³ /d	Przepływ przez filtr z piasku gruboziarnistego	HF; 14,9
Francja w regionie Bordeaux	-	Przepływ przez filtr z piasku gruboziarnistego + intensywne napowietrzanie w zbiorniku wyrównawczym	2 VF szeregowo; 157+174
Francja w regionie Bordeaux	-	Przepływ przez filtr z słomy	2 VF szeregowo; 35,6 w całości
Winnica La Croce, w pobliżu Sieny	< 8 m ³ /d	Zbiornik Imhoffa	HF; 215
Bolgheri (prowincja Leghorn)	42 m ³ /d	Szambo	2 HF równoległe+VF+VF+VF+FWS+ Stawy; 1316 w całości
Castellina in Chianti-Siena	35 m ³ /d	Zbiornik Imhoffa	HF (480) + FWS (850)
Hopland, California	137 m ³ /d	Staw osadowy	HF, 4400
Glen Ellen, California	21 m ³ /d	Staw osadowy	HF, 304
California	6 m ³ /d	-	2 HF równoległe; każdy 58
California	22 m ³ /d	-	2 HF równoległe; 72 + 49
Galiza (pn.-zach. Hiszpania)	6,8 m ³ /d	Beztlenowa komora fermentacyjna, 6m ³	VF (50) i 3 równoległe HF (każdy 100)

Tabela 7. Efektywność usuwania materii organicznej w oczyszczalniach hydrofitowych przy winnicach [21].

Typ i miejsce	Powierzchnia [m ²]	Głębokość [m]	Obciążenie hydrauliczne [mm/d]	Obciążenie złoża substancjami organicznymi [gChZT/m ² d]	Efektywność [%]	Uwagi
HF California, USA	14,9	1,2	-	35-164	98	Zatykanie
VF+HF Pontevedra, Hiszpania	50 +100	1,4+(0,3;0,6)	19,5	30,4	73	
HF Hopland, USA	4400	1,1-1,2	31,1	21-72	49-79	
HF Goudini, RPA	180	1,2	22,5	315	77-88	
HF Goudini, RPA	180	1,2	45	180-540	60	
HF Cape Town, RPA	1,7	0,3	3	54-112	81-99	

Oczyszczalnia hydrofitowa w Pekinie powoduje usuwanie substancji organicznych wyrażonych w BZT5 na poziomie 60%, fenoli w 63%, natomiast olejów i tłuszczów w 65%, jednakże w oczyszczalni tej ścieki doprowadzane są po uprzednim oczyszczeniu w tradycyjnych obiektach tj. separatory czy napowietrzane laguny biooksydacyjne. [11]. Jak wynika z badań przeprowadzonych w wyżej wymienionych miejscach, oczyszczalnie hydrofitowe pozwalają na skuteczne oczyszczanie ścieków pochodzących z przemysłu rafineryjnego.

W Polsce zostały przeprowadzone jedynie badania nad możliwością usuwania zanieczyszczeń ropopochodnych na oczyszczalniach hydrofitowych. W tym celu wybudowana została oczyszczalnia eksperymentalna położona w pobliżu stacji benzynowej w Balicach, usytuowanej przy ul. Olszanickiej. Oczyszczalnia sąsiaduje również z: Międzynarodowym Portem Lotniczym Kraków-Balice (zachód), potokiem (północ), a także z autostradą A4 (wschód). Pierwszym elementem instalacji jest osadnik wstępny, z którego podczyszczone ścieki przepływają do pierwszego złoża hydrofitowego za pomocą rury perforowanej gwarantującej stabilny przepływ. Oczyszczalnia eksperymentalna składa się z dwóch złożów połączonych szeregowo o przepływie podpowierzchniowym poziomym. Wypełnienie złożów składa się z żwiru o średnicy 8–20 mm oraz porowatości 37%. Odpływ z drugiego złoża hydrofitowego jest zatrzymywany

w osadniku końcowym, który stanowi ostatni element oczyszczalni eksperymentalnej. Do instalacji trafiają ścieki deszczowe zbierane z placu z dystrybutorami paliwa, parkingu przy stacji benzynowej oraz wewnętrznej drogi dojazdowej, a także z dachu obiektu stacji i zadaszenia nad dystrybutorami paliwa. Do badań posłużyły próby ze ściekami pobieranymi z dopływu do osadnika wstępnego, a także z odpływu z osadnika końcowego. Najistotniejszym parametrem badań w pobranych próbkach było określenie stężenia sumy węglowodorów alifatycznych (TAH). Dodatkowo mierzono koncentrację poszczególnych węglowodorów. Wyniki stężenia TAH w dopływie do instalacji eksperymentalnej wynosiły od 0,096 mg/dm³ do 6,177 mg/dm³. Natomiast w odpływie wahały się od 0,048 mg/dm³ do 5,011 mg/dm³. W przeprowadzonych badaniach średnia efektywność usuwania TAH wyniosła 48% i była dużo niższa niż wartości spotykane w artykułach innych autorów, w których osiągnięte wartości efektywności usuwania TAH wynosiły od 70 do 90%. We wszystkich badanych próbkach ścieków zaobserwowano identyczny rozkład poszczególnych węglowodorów alifatycznych. Najwięcej było alkanów o ilości atomów węgla od 14 do 20, mniej węglowodorów cięższych, a najmniej było najlżejszych. Z najniższą efektywnością usuwane były węglowodory od C14 do C18, ze skutecznością mieszczącą się w granicach od 26% do 32%. Węglowodory lżejsze były usuwane z efektywnością od

39% do 68%. Najwyższą efektywność usuwania TAH uzyskano dla węglowodorów z najwyższymi liczbami atomów węgla w cząsteczce. Dla C20 efektywność wynosiła 51% , natomiast dla C26–C30 mieściła się w granicach 92% - 93%.

Wynik niskiej średniej efektywności usuwania TAH, który wyniósł 48% może być spowodowany przez szereg zjawisk atmosferycznych. W okresie prowadzonych badań występowała wysoka intensywność opadów. Spowodowało to, iż ilość ścieków wpływających do oczyszczalni była bardzo duża, natomiast poziom ich skażenia substancjami ropopochodnymi był stosunkowo niski. Do niskiej efektywności złoża hydrofitowego mógł również przyczynić się fakt, iż był to pierwszy sezon funkcjonowania oczyszczalni, więc plantacja roślin i mikroorganizmy miały zbyt mało czasu na pełne ukorzenie i wpracowanie się złoża. Badania te potwierdziły również tezę, która mówi, że trzcina pospolita (*Phragmites australis*) jest rośliną odporną na obecność i działanie związków ropopochodnych. Podczas trwania badań nie zauważono żadnych negatywnych zmian w plantacji trzciny [22]. Jednakże podczas badania wpływu związków ropopochodnych na wierzbę wiciową (*Salix viminalis*) zaobserwowano negatywne zmiany zachodzące w roślinie np. pożółkłe liście i wolniejszy wzrost. Trzcina pospolita okazała się gatunkiem znacznie bardziej odpornym na obecność i działanie substancji ropopochodnych. Roślina ta wykazała również lepszy wzrost w porównaniu do badań przeprowadzonych z czystą wodą [23].

Przeprowadzone badania potwierdziły użyteczność oczyszczalni hydrofitowych do oczyszczania ścieków i ochrony środowiska przed związkami ropopochodnymi obecnymi w ściekach pochodzących z przemysłu rafineryjnego.

6. Wnioski.

1. Oczyszczalnie hydrofitowe są obiecującą alternatywą dla konwencjonalnych metod oczyszczania ścieków. Z powodzeniem mogą być wykorzystywane na terenach chronionych i cennych krajobrazowo, ponieważ poprzez swój wygląd nie zakłócają otaczającego je środowiska. Są dobrym rozwiązaniem do oczyszczania ścieków na terenach wiejskich, nieskanalizowanych bądź o rozproszonej zabudowie.
2. Kryteria stosowane przy wyborze systemów oczyszczania ścieków obejmują: prostotę i łatwość obsługi, niezawodność działania, koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a także wpływ na środowisko naturalne i estetykę. Jednakże czasem decydującym i najważniejszym czynnikiem przy wyborze oczyszczalni są względy ekonomiczne.
3. Przydomowe oczyszczalnie ścieków, w tym też te roślinne, nie są obiektami bezobsługowymi. Niektóre gatunki roślin stosowane w tego rodzaju oczyszczalniach wymagają pielęgnacji i przycinania. Złóże potrzebuje również więcej czasu na wpracowanie (nawet do 3 lat) w celu uzyskania pełnej sprawności w oczyszczaniu ścieków.
4. Stosowanie wielogatunkowych oczyszczalni wpływa na ich większą skuteczność w usuwaniu różnego rodzaju zanieczyszczeń. Najczęściej stosowanymi gatunkami roślin do oczyszczania ścieków są trzcina pospolita i wierzb wiciowa. Projektując oczyszczalnię przy wyborze roślin należy przede wszystkim uwzględnić rodzaj doprowadzanych ścieków oraz panujące na danym terenie warunki klimatyczne.
5. Najwyższą efektywnością w usuwaniu zanieczyszczeń charakteryzowały się wielostopniowe oczyszczalnie roślinne, w których skład wchodziły różne konfiguracje złóż z podpowierzchniowym pionowym i poziomym oraz z powierzchniowym przepływem ścieków. Obiekty te usuwają zawiesiny ogólne na poziomie 85%, redukują wskaźniki w postaci BZT₅ i ChZT do 96% i 94%. Efektywność usuwania azotu ogólnego oscyluje na poziomie 60%, a fosforu od 77 do 95%. Najwyższą efektywność oczyszczalni uzyskuje się w okresie od czerwca do sierpnia, ponieważ jest to okres wegetacji roślin. Zaletą stosowania oczyszczalni roślinnych jest wysoka sprawność oczyszczania ścieków oraz to, że nie przyczyniają się one do powstawania wtórnych osadów ściekowych.
6. W oczyszczalniach ze złożami z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków zaobserwowano wyższy potencjał biodegradacji, niż w złożu z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków. Na efektywność ma wpływ lepsze natlenienie złoża VF-CW, co skutkuje większą liczbą mikroorganizmów odpowiedzialnych za procesy biodegradacji w złożu. W złożach typu HF-CW panują warunki sprzyjające procesowi denitryfikacji lecz niekorzystne dla procesu nityfikacji. Natomiast w złożach VF-CW sytuacja wygląda odwrotnie i skuteczniej przebiegają procesy nityfikacji. Dlatego też aby zarówno proces nityfikacji, jak i denitryfikacji mógł przebiegać prawidłowo coraz częściej stosowane są oczyszczalnie hybrydowe. Ważnym elementem w złożach z podpowierzchniowym przepływem ścieków jest rodzaj gleby, ponieważ piaszczysta gleba ułatwia ruch wody, co przekłada się na efektywniejsze usuwanie zanieczyszczeń w porównaniu ze złożami wykonanymi z gleb gliniastych.

7. Literatura

- Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H.: 20 lat doświadczeń z eksploatacji oczyszczalni hydrofitowych w Polsce. *Rocznik Ochrony Środowiska*, Wydawnictwo Środkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego Ochrony Środowiska. 2009, 11 (62) 875-888.
- Bergier T., Dunajski A., Szymura M., Szymura T.: Oczyszczalnie roślinne jako rozwiązanie problemów ścieków w obiektach zabudowy rozproszonej. Wrocław, 2010.
- Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojki A.: Koncepcja rozwiązania problemu przydomowej gospodarki ściekowo-osadowej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. 2009, 7-8, 6-10.
- Burszta-Adamiak E., Łomotowski J., Kuśnierz M., Smolińska B.: Oczyszczanie wód z zawiesin w systemach hydrofitowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. 2011, 9 483-485.
- Warężak T., Sadecka Z., Myszograj S., Suchowska-Kisielewicz M.: Skuteczność oczyszczania ścieków w oczyszczalni hydrofitowej typu VF-CW. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2013, 15 1243-1259.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz.U. 2014 poz. 1800.
- Sawicka-Siarkiewicz H.: Jakość wód opadowych w aspekcie warunków odprowadzania do odbiorników. *Przegląd Komunalny*. 2006, 4 16-17.
- Grabarczyk K., Gwoździej-Mazur J.: Analiza zanieczyszczeń ścieków opadowych ze zlewni zurbanizowanych. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*. 2005, 32.
- Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Arendacz M.: Oczyszczanie wód opadowych w obiektach hydrofitowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. 2008, 9 56-59.
- Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E.: Usuwanie zanieczyszczeń z wód opadowych. *Wodociągi Kanalizacja*. 2012, 4 54-55
- Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H., Wojciechowska E.: *Hydrofitowe oczyszczanie ścieków*. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa, 2010.
- Paruch A., M, Roseth R.: Treatment of tunnel wash waters – experiments with organic sorbent materials. Part II: Removal of toxic metals. *Journal of Environmental Sciences*. 2008, 20 1042-1045.
- Pawęska K., Kuczewski K.: Przydomowe oczyszczalnie na terenach cennyh krajobrazowo - proponowane rozwiązania, efekty pracy. *Gaz, Woda i Tech. Sanitarna*. 2013, 2 76-79.
- Wolska M., Ocena efektywności pracy wybranych oczyszczalni hydrofitowych, Praca magisterska, Politechnika Łódzka, 2015 r.
- Bergier T., Czech A., Czupryński P., Łopata A., Wachniew P., Wojtal J.: *Roślinne oczyszczalnie ścieków - przewodnik dla gmin*. Kraków, 2004.
- Zhang D., Gersberg R. M., Ng W. J., Tan S. K.: Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: A review. *Environmental Pollution*. 2014, 184 620-639.
- Verlicchi P., Zambello E.: How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review. *Science of the Total Environ*. 2014, 470-471 1281-1306.
- Dąbek L., Ozimina E., Picheta-Oleś A.: Badania nad usuwaniem barwnych związków organicznych ze ścieków z przemysłu włókienniczego. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2013, 15 1164-1176.
- Olejnik D., Wojciechowski K.: Oczyszczanie ścieków barwnych w oczyszczalniach hydrofitowych. *Barwniki, Środki Pomocnicze*. 2010, 4 151-157.
- Olejnik D., Wojciechowski K.: Koncepcja roślinnej oczyszczalni ścieków do usuwania barwników z roztworów wodnych. *Chemik*. 2012, 66 (6) 611-614.
- Wu S., Wallace S., Brix H., Kusch P., Kirui W., Masi F., Dong R.: Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*. 2015, 201 107-120.
- Bergier T.: Efektywność usuwania związków ropopochodnych ze ścieków deszczowych przez eksperymentalne złoża hydrofitowe w skali półtechnicznej. *Archives of Environmental Protection*. 2011, 37(4) 75-84.
- Bergier T., Włodyka-Bergier A.: Oczyszczanie ścieków zawierających ropopochodne na złożach hydrofitowych z wykorzystaniem makrofitów: *Phragmites Australis* i *Salix Viminalis*. *PAN Komitet Inżynierii Środowiska*. 2009, 58 17-26.