



Alternatywne metody oczyszczania ścieków mleczarskich

Hydrofitowe oczyszczalnie

Z. Romanowska-Duda
Uniwersytet Łódzki, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska

1. Ścieki jako źródło zanieczyszczeń wód w Polsce

Jednym z podstawowych źródeł zanieczyszczających wody w naszym kraju są miejskie ścieki komunalne i przemysłowe oraz spływy powierzchniowe z pól uprawnych i obszarów nieskanalizowanych. Ponadto producentami generującymi istotne ilości ścieków są przemysł górniczy, metalurgiczny, włókienniczy, chemiczny, paliwowo-energetyczny, celulozowy, garbarski i rolno-spożywczy do którego zalicza się m. in. **zakłady mleczarskie**. Skład chemiczny ścieków jest bardzo zróżnicowany, a w jego masę depozytową wchodzi związków organicznych i nieorganicznych w tym metale ciężkie.

Przemysł mleczarski należy do głównych przemysłów spożywczych w Polsce. W latach 2000-2010 wystąpił wzrost wartości produkcji mleka o 58,9%. W kraju produkuje się rocznie prawie 12 mld litrów mleka. Przyjmując wskaźnik ilości powstających ścieków na jednostkę produkcji na poziomie 3,5 m³/m³ przerabianego mleka, można oszacować, że **w Polsce powstaje około 92000 m³ ścieków mleczarskich na dobę** (Struk-Sokołowska, 2011). Według danych G.U.S. z 2008 roku, liczba podmiotów gospodarczych zajmujących się przetwórstwem mleka na terenie Polski wynosiła 224. W zależności od stosowanej technologii i produkcji asortymentu jednostkowe zużycie wody wynosi od 3 L /L przetwarzanego mleka w produkcji napojów mlecznych i mleka, aż do 20 L/L w procesie produkcji masła i serów żółtych (Dąbrowski 2011). Ścieki mleczarskie charakteryzują się znacznie wyższymi wartościami wskaźników zanieczyszczeń oraz zmiennością ładunku w porównaniu do ścieków komunalnych, co powoduje, że eksploatacja tych obiektów jest znacznie trudniejsza (Anielak 2008; Bartkiewicz i Umiejewska 2010). Dodatkową niedogodność stanowią wahania ładunku zanieczyszczeń odprowadzanych z zakładów mleczarskich. Dlatego istotne jest efektywne usuwanie zanieczyszczeń ze ścieków mleczarskich w aspekcie ochrony środowiska wodnego, a niezbędnym



elementem stały monitoring parametrów jakości ścieków w całym profilu oczyszczalni, który będzie umożliwiały korygowanie pracy urządzeń w oczyszczalni.

Na obszarze zakładów mleczarskich przepompowywanie mleka z cystern dostawczych odbywa się systemem rurociągu, który jest higienizowany wielokrotnie w ciągu doby. Stosowane środki w tej praktyce to roztwory kwasu azotowego, które mają za zadanie zapobieganie osadzaniu się osadów nieorganicznych oraz ług sodowy, usuwający białka i tłuszcze. Powstające w ten sposób ścieki mają wspólną bazę we wszystkich typach zakładów mleczarskich, natomiast ilość i kondensacja ścieków poprodukcyjnych jest uwarunkowana profilem produkcji. (Tab. 1, 2, 3).

Tab. 1. Ilość ścieków ($m^3/1000$ L mleka) w zależności od profilu produkcji (Bartkiewicz 2006).

Produkcja	Ilość ścieków
Mleko w proszku	1,5-3,0
Twarogi	5
Sery twarde	6
Mleko spożywcze	6
Kazeina	6
Sery topione	12
Masło	20

Zakresy koncentracji zanieczyszczeń w ściekach ogólnych w zakładach mleczarskich podano w Tab. 2.

Tab. 2. Wartości koncentracji zanieczyszczeń w ściekach mleczarskich ogólnych (Bartkiewicz 2006).

Oznaczenie	Wartość
BZT ₅	500-2000 mg tlenu L ⁻¹
ChZT	700 – 2800 mg O ₂ /L
Azot ogólny	30-150 g/m ³
Fosfor ogólny	20- 100 g/m ³
pH	9-10,5



Projekt „Naukowcy dla gospodarki województwa łódzkiego”
współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Tab. 3. Skład ścieków mleczarskich uzależniony od rodzaju produkcji (Bartkiewicz 2006).

Oznaczenie	Rodzaj produkcji						
	Sery	Kazeina	Twarogi	Masło	Mleko w proszku	Sery topione	Mleko spożywcze
pH	7,0	6,4	6,6	7,5	7,6	7,2	7,2
Utlentialność, g O ₂ /m ³	500	480	1020	200	575	485	550
ChZT g O ₂ /m ³	3950	1360	3420	1055	2090	1450	2090
BZT g O ₂ /m ³	1760	1300	1900	690	1135	875	1160
Ekstrakt eterowy g/m ³	150	31	100	75	32	375	60
Zawiesiny w g/ m ³	350	400	485	200	505	1980	205
Sucha pozostałość, g/m ³	2020	1800	1920	1100	1090	3250	1460

Oczyszczanie ścieków może być przeprowadzane z zastosowaniem naturalnych lub konwencjonalnych systemów. Każda technologia ma swoje zalety i wady. **Konwencjonalne technologie** takie jak bioreaktory membranowe, wymagają znaczącego udziału energii, podczas gdy naturalne technologie jak skonstruowane fitooczyszczalnie, uwzględniające **proces fitoremediacji** są zależne przede wszystkim od naturalnych źródeł energii, takich jak wiatr, promieniowanie słoneczne i magazynowanie biomasy (Kadlec i Knight, 1996).

2. Właściwości fitoremediacyjne roślin

Szybki rozwój obszarów miejskich i wiejskich oraz przemysłu jest często związany ze znacznym generowaniem ścieków poprodukcyjnych, które wymagają procesu oczyszczania przez środowisko naturalne. W ostatnich latach rośliny stały się efektywnym narzędziem w przywracaniu równowagi zdegradowanego środowiska. W swoim cyklu życiowym w okresie wegetacyjnym wpływają na procesy fizyczne, chemiczne oraz biologiczne w otaczającym je środowisku i z tego powodu chętnie wykorzystywane są m.in. w technologii oczyszczania ścieków oraz rekultywacji gleby i wychwytywania zanieczyszczeń gazowych z powietrza atmosferycznego. Metody oczyszczania środowiska oparte na fitotechnologiach i inżynierii środowiskowej zyskują coraz więcej zwolenników. Technologie te są proste w obsłudze, tanie, skuteczne i proekologiczne oraz mogą być prowadzone *in situ*.

Fitoremediację definiujemy jako proces usuwania lub detoksykacji zanieczyszczeń ze środowiska za pomocą roślin wyższych. Technologia ta opiera się na zdolnościach pewnych gatunków



i odmian roślin do tolerancji na wysokie stężenia związków toksycznych, pobierania, akumulacji i metabolizmu tych związków w dużych ilościach we własnych organach bądź do ich przekształcenia w związki nietoksyczne. Rośliny mając aktywny wpływ na zachodzące w naturze procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne, zmieniają je tak, aby umożliwić przebieg własnego cyklu życiowego. Ponadto organizmy roślinne wyposażone są w mechanizmy obronne. Pobierając, metabolizując i/lub koncentrując we własnych tkankach substancje toksyczne, oczyszczają środowisko z ksenobiotyków, które w większości posiadają własności kancerogenne.

Pierwsze udane próby wykorzystania fitoremediacji do rolniczego zagospodarowania ścieków komunalnych miały miejsce w Niemczech już na początku XIX wieku. Od dawna doceniana jest także rola roślin w oczyszczaniu powietrza wielkich aglomeracji miejskich, chociaż największe zainteresowanie tą metodą i pierwsze wdrożenia zostały podjęte dopiero na początku lat osiemdziesiątych. Rezultaty badań naukowych pozwoliły na opracowanie podstaw biotechnologii środowiskowej, wykorzystującej rośliny do usuwania z gleby metali ciężkich i ksenobiotyków organicznych, powstałych w wyniku rozwoju różnych gałęzi przemysłu.

Technologie oparte na fitoremediacji umożliwiają:

- Redukcję zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych oraz ich koncentrację w zbieranych częściach roślin
- Rozkład związków toksycznych przez symbiotyczny układ roślina - mikroorganizmy (strefa korzeniowa)
- Sorpcję zanieczyszczeń z wody i ścieków przez korzenie roślin
- Obniżenie biodostępności i odparowanie zanieczyszczeń

W procesie fitoremediacji można wyróżnić poniższe kierunki technologiczne: **Fitodegradacja** – pobieranie szkodliwych związków i transformacja ich za pomocą kompleksów enzymatycznych i cyklu metabolicznego; **Fitoekstrakcja** - unieszkodliwienie niepożądanych substancji w tkance roślinnej; **Rizofiltracja** – sorpcja zanieczyszczeń z wody oraz ścieków przez korzenie roślin. Wykorzystuje się heterogenne warianty rizofiltracji, począwszy od mat pływających po powierzchni zbiorników i utrzymujących korzenie roślin w wodzie (słonecznik, *Helianthus annuus* L.), przez rośliny wodne, takie jak: trzcina (*Phragmites australis*), pałka wodna (*Typha latifolia*), hiacynt wodny (*Eichhornia crassipes* L.) czy **rzęsa wodna** (*Lemna minor* L.), turzyca bagienna (*Carex limosa*),



sitowie leśne (*Scirpus sylvaticus*), aż do kultur korzeniowych *in vitro*. **Fitostabilizacja** - detoksykacja substancji poprzez unieruchomienie zanieczyszczeń w matrycy glebowej **Fitowolatalizacja** - neutralizacja zanieczyszczeń poprzez modyfikacje w postaci gazową (Kopcewicz, Lewak 2007).

Skuteczność technologii zależy od doboru odpowiedniego gatunku roślin. Idealna roślina do procesu fitoremediacji powinna charakteryzować się wysokim poziomem sorpcji oraz nadekspresją naturalnych i zmodyfikowanych genów kodujących białka i enzymy, odpowiedzialnych za odporność na metale ciężkie. Ponadto powinna wykazywać się również efektywną akumulacją toksycznych związków w częściach nadziemnych, wytrzymałością oraz tolerancją na zanieczyszczenia, w tym na kilka metali jednocześnie, a także dużym przyrostem biomasy i prostą uprawą.

Zaletami fitoremediacji jest jej szerokie spektrum działania, minimalna inwazyjność na środowisko oraz niewątpliwe walory estetyczne. Jest ona wysoce efektywna w usuwaniu wybranych substancji i zapobieganiu erozji gleby oraz dyspersji zanieczyszczeń w środowisku. Jest to technika niskokapitałowa w odniesieniu do innych metod oczyszczania, przyjazna środowisku, społecznie akceptowana i stanowi przyszłościowy kierunek w biotechnologii środowiskowej.

Wadą fitoteremediacji jest długi czas uzyskiwania efektów oczyszczania. Zakłada się, że powinien on trwać nie dłużej niż 5 lat, a w wyjątkowych przypadkach do 10 lat, ze względu na ograniczony okres wegetacyjny roślin. Przy bardzo wysokich stężeniach zanieczyszczeń, fitotechnologia ta może być trudna do realizacji i zwykle musi być uzupełniona o inne techniki remediacyjne. Istnieje również problem przemieszczania się zanieczyszczeń z gleby do powietrza, co wymusza konieczność utylizacji zanieczyszczonej biomasy. Fitoremediacja jest uzależniona od strefy penetracji korzeni i wrażliwości roślin na czynniki stresowe. Odmienną kwestią do rozwiązania jest deponowanie i usuwanie roślin akumulujących toksyczne zanieczyszczenia (Koncewicz, Lewak 2007).

W ostatnich latach metoda oczyszczalni hydrofitowych, jest z powodzeniem wykorzystywana do oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych (Pevery i in., 1995; Kowalik i in., 1996; Ye i in., 1997, Kadlec., 2003; Bulc, 2006; Wojciechowska i in., 2010). Działanie systemów hydrofitowych jest wzorowane na naturalnych ekosystemach podmokłych, tzw. wetlandach [BRIX, 1994]. Systemy te, podobnie jak występujące w przyrodzie siedliska roślin bagiennych, mają zdolność do rozkładu i zatrzymywania zanieczyszczeń (Obarska-Pempkowiak i in. 2010). Ta niekonwencjonalna metoda w przypadku małych oczyszczalni mleczarskich może stanowić



ekonomiczne rozwiązanie w odniesieniu do kosztownych technologii dotychczas stosowanych, opartych na metodach fizycznych, chemicznych i biologicznych, oraz kombinacjach tych metod, co w konsekwencji powoduje wzrost kosztów eksploatacyjnych oczyszczalni.

Główny podział oczyszczalni hydrobotanicznych uzależniony jest od kierunku przepływu ścieków oraz rodzaju zastosowanej w nich roślinności. **Systemy z poziomym przepływem ścieków** – ścieki przepływają poziomo kilka centymetrów pod powierzchnią złoża (**HF-CW**; *horizontal flow constructed Wetland*) i **systemy z pionowym przepływem ścieków** – ścieki rozprowadzane są nad złożem, następnie przepływają pionowo w dół, gdzie są zbierane drenażem rozsączającym, a materiał filtrujący jest ułożony w gradencie od najdrobniejszej frakcji na powierzchni do warstwy kamienistej na dnie (**VF-CW**; *vertical flow constructed wetland*). Systemy z **powierzchniowym przepływem** – ścieki przepływają nad powierzchnią gruntu, a sieć przegród hydraulicznych powoduje spowolnienie przepływu ścieków przez wydzielony teren. Mogą też być konstruowane systemy mieszane (HF-CW i VF-CW).

Inny podział oczyszczalni został dokonany w oparciu o rodzaj zastosowanych roślin w systemie oczyszczania. W tym przypadku można wyróżnić: oczyszczalnie z roślinnością bagienną, z roślinnością wodną zakorzenioną, roślinnością wodną pływającą i oczyszczalnie wierzbowe.

Złóża o przepływie pionowym i poziomym mogą być zastosowane w III fazie oczyszczania ścieków mleczarskich po etapie mechanicznego i biologicznego oczyszczania. **Oczyszczalnie hydrofitowe**, to typowe naturalne i środowiskowo przyjazne układy, wykorzystują zakorzenione lub pływające rośliny, żwir i ziemię do masowego oczyszczania ścieków (Kadlec i Knight, 1996; Kadlec R.H., 2003). Technologie obróbki w zielonych hydrofitowych oczyszczalniach mają unikalną zaletę produkcji wyższej jakości ścieków bez konieczności stosowania energii z paliw kopalnych, zmniejszając w ten sposób koszty eksploatacji (Sim i in., 2008; Lee i in., 2010; Bruch i In., 2011). Różnorodność procesów biochemicznych zachodzących w tych systemach zapewnia usuwanie nie tylko substancji organicznej i związków azotu, ale również zanieczyszczeń specyficznych. ze stabilną, wysoką skutecznością (Maehlum, 1998; Bulc 2006, Wojciechowska i in., 2010, Obarska-Pempkowiak i in. 2010).

Najczęściej stosowane rośliny w oczyszczalniach hydrofitowych to takie, które mają rozbudowany system kłaczy i korzeni i charakteryzują się znaczną odpornością na zmienne warunki klimatyczne i zanieczyszczenia. Bardzo popularnymi i spełniającymi te wymagania są trzcina



(*Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steudel), i wiklina (*Salix viminalis* L.). W krajach strefy umiarkowanej do oczyszczania odcieków stosowana jest mozga trzinowa – *Phalaris arundinacea*. Ma ona węższy zasięg występowania niż trzcina, jest rośliną wieloletnią, raz wysiana może być wykorzystywana przez 10–12 lat. Z kolei w ciepłych strefach klimatycznych Azji do oczyszczania ścieków stosuje się naturalnie występujące tam trawy, takie jak: miskant olbrzymi – *Miscanthus x giganteus*, wetiweria pachnąca – *Vetiveria zizanioides*, trzcina laskowa – *Arundo donax*. Poza trawami testowane były inne rośliny zielne, jak: oczeret – *Schoenoplectus lacustris*, pałki – *Typha latifolia* i *T. angustifolia* oraz rośliny pływające, rzęsa drobna – *Lemna minor*, hiacynt wodny – *Eichhornia crassipes* (Ozimek 2009).

Dopływający tlen z powietrza atmosferycznego przez tkankę gazową - aerenchymę do części podziemnych roślin, tworzy wokół korzeni i kłaczy mikrostrefy tlenowe (z O₂), okolone mikrostrefami niedotlenionymi, (bez O₂ i w obecności NO₃⁻), a w dalszej części mikrostrefy redukcyjne (bez O₂ i NO₃⁻). Takie warunki sprzyjają rozwojowi mikroorganizmów heterotroficznych, które są aktywne w przemianach biochemicznych zanieczyszczeń doprowadzanych w ściekach. Rośliny używane w fitooczyszczalniach charakteryzują się szybkim przyrostem biomasy, który jest wynikiem intensywnych procesów metabolicznych, spowodowanych pobieraniem związków biogennych. (Lalke-Porczyk 2010; Pempkowiak i in. 2010a,b). Przykładem istniejącej tego typu oczyszczalni ścieków mleczarskich jest obiekt znajdujący się w Wysokiem Mazowieckiem (Dąbrowski 2011). W technologii tej zastosowano układ hybrydowy, składający się z przepływu pionowego (VF-CW) i poziomego (HF-CW). W obiektach o przepływie podpowierzchniowym jest znacznie trudniej uzyskać wysoką skuteczność usuwania zanieczyszczeń. W tab. 4 przedstawiono efektywności oczyszczania dla obiektów hydrofitowych oczyszczających odcieki ze składowisk odpadów pracujących w różnych krajach (Bugajski 2006; Wojciechowska 2011;).



Projekt „Naukowcy dla gospodarki województwa łódzkiego”
 współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Tab. 4. Efektywności oczyszczania dla obiektów hydrofitowych oczyszczających odcieki ze składowisk odpadów wg danych literaturowych (Wojciechowska, 2011)

Nazwa obiektu, kraj, literatura	Konfiguracja	Efektywność usuwania zanieczyszczeń [%]			
		BZT ₅	ChZT _{og4}	N N-NH ₄ ⁺	
Esval, Norwegia	laguna beztlenowa laguna napowietrzająca 2 równoległe złoża HSSF staw hydrofitowy doczyszczający	91	88	83	
Dragonja, Słowenia	zbiornik wyrównawczy 2 równoległe złoża HSSF	59	50		50
Perdido, Floryda, uSA	laguna napowietrzająca system FWS	95	88		99
Lafleche, Ontario, Kanada	zbiornik wyrównawczy filtr gruntowy o wypełnieniu torfowym złożo HSSF staw hydrofitowy	93-99		90-94	97-99
Isatra, Szwecja	zbiornik wyrównawczy reaktor SBR zbiornik wyrównawczy obszar zalewowy złożo HSSF	82	40	77	99
Órebro, Szwecja	staw napowietrzający system 10 sta.wów hydrofitowych (FWS)	95	68	91	94
Chlewnica, Polska	VSSF-1+VSS-2+HSSF	95* 95**	87* 48**	98* 86**	99* 94**

* Pierwszy rok eksploatacji, ** Drugi rok eksploatacji

Różne rodzaje zanieczyszczeń (takich jak: azot, fosfor, związki organiczne, metale ciężkie i bakterie z grupy E. coli) można usunąć przez hydrofitowe oczyszczalnie jako kompleks powiązanych ze sobą systemów roślinnych, wody, mediów i populacji biomasy (Fountoulakis i in., 2009). Usuwanie azotu i związków organicznych (ze ścieków) w takiej inżynierii ekosystemowej jest niezmiernie ważne, ze względu na często niekontrolowane odprowadzanie azotu do naturalnych zbiorników śródlądowych wodnych, co sprzyja ich eutrofizacji (Xinshan i in., 2010; Chen i in., 2011). Dodatkowo nieprzetworzona materia organiczna często wyczerpuje rozpuszczony tlen (DO), co prowadzi do śmierci organizmów wodnych. Jakość ścieków poddawanych oczyszczaniu i doczyszczaniu w złożach roślinnych znacznie się poprawia. W pracy Lalke-Porczyk i in. (2010) odnotowano zmniejszenie liczebności różnych grup bakterii. Należy jednak pamiętać, że nawet ścieki, w których liczebność bakterii wskaźnikowych została bardzo ograniczona, mogą być nadal źródłem drobnoustrojów patogennych (Filipkowska, 2003; Jezierska-Tys S., M. Frąc 2008). Po zastosowaniu hydrofitowych oczyszczalni, liczebność bakterii heterotroficznych zdolnych do wzrostu w temperaturze 22°C malała średnio w 85,86% – w oczyszczalni wierzbowej, a w 89,45% – w oczyszczalni trzcinowej. Natomiast liczebność bakterii heterotroficznych zdolnych do wzrostu w temperaturze 37°C w tych oczyszczalniach malała odpowiednio w 88,46 i 90,22%. Z kolei spośród bakterii wskaźnikowych stanu



sanitarnego w najmniejszym stopniu malała liczebność paciorkowców kałowych. W oczyszczalni wierzbowej liczebność bakterii tej grupy malała średnio w 84,65%, a w oczyszczalni trzcinowej w 87,26%. Odnotowano, że w ciągu 8 miesięcy trwania badań obydwie oczyszczalnie roślinne działały bezawaryjnie, przyczyniając się do znacznej eliminacji mikroorganizmów ze ścieków, również w miesiącach chłodniejszych, tj. listopadzie i grudniu (Lalke-Porczyk 2010).

3. Mechanizmy przemian związków w systemach hydrofitowych

Oczyszczalnie hydrofitowe są wzorowane na systemach, określanych jako ‘constructed Wetland’ i są rozpowszechnione w Europie Zachodniej oraz USA, natomiast w znacznie mniejszym zakresie w Polsce.

Hydrofitowa metoda oczyszczania ścieków jest procesem biologicznym zachodzącym we współpracy z mikroorganizmami heterotroficznymi oraz roślin wodnych i hydrofitów (wodolubnych). W procesie oczyszczania ścieków na skutek specyficznych warunków, a jednocześnie dogodnych do rozwoju hydrofitów, następuje intensyfikacja procesów utleniania i redukcji, które są wspomagane przez procesy sorpcji, sedymentacji i asymilacji – umożliwiają usuwanie znacznej części zanieczyszczeń ze ścieków. Do unikalnych zalet tego systemu oczyszczania można zaliczyć niski koszt eksploatacji i konserwacji, zastosowanie poziomej i pionowej deportacji ścieków oraz naturalny wygląd, który umożliwia ich łatwe wkomponowanie w istniejący krajobraz. Oczyszczalnie hydrofitowe w przeciwieństwie do konwencjonalnych systemów biologicznych nie wytwarzają wtórnych osadów ściekowych. Posiadają zdolność usuwania substancji organicznych i związków biogenych N i P oraz zanieczyszczeń takich jak metale ciężkie i niektórych mikrozanieczyszczeń organicznych. W tego typu systemach usuwanie zanieczyszczeń często opiera się na różnorodnych współistniejących fizycznych, chemicznych oraz biologicznych szlakach, które są niezwykle zależne od środowiska i licznych parametrów eksploatacyjnych (Obarska-Pempkowiak i in. 2010)

4. Efektywność oczyszczania ścieków mleczarskich w systemach hydrofitowych

W kraju w latach 70-tych na terenie Polski rozpowszechniła się technologia oczyszczania ścieków mleczarskich „Promlecz”. Większość tego typu oczyszczalni wymaga niezbędnej modernizacji z powodu ich stanu technicznego i zmniejszone możliwości wydajności oczyszczania ze względu na wzrost produkcji w zakładach, co generuje znacznie powiększoną ilość ścieków, osadów i



odcieków. Nowoczesna technologia oczyszczania ścieków to nie tylko wysokoefektywne lecz również niskoenergochłonne metody usuwania zanieczyszczeń. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię, niezbędną do oczyszczania ścieków osadem czynnym, można uzyskać prowadząc oddzielnie poszczególne fazy biologicznego oczyszczania, a więc adsorpcję zanieczyszczeń, biologiczny rozkład związków organicznych do związków prostych oraz przemiany związków azotowych (Mańczak i in. 1997; Obarska-Pępkowaiak i in. 2010; Sadecka 2003; Sadecka 2011).

Metoda hydrofitowa może stanowić alternatywę dla zaawansowanych i kosztownych technologii. Złoża o przepływie pionowym i poziomym mogą być wykorzystywane jako drugi stopień oczyszczania ścieków mleczarskich, po ich wstępnym mechanicznym i biologicznym oczyszczeniu, a także mogą być stosowane do oczyszczania odcieków generowanych w oczyszczalni mleczarskiej, które zawierają niemały ładunek związków biogenych (Dąbrowski, 2011b,c; Sadecka 2003, 2011). Przykładem pomyślnego zastosowania systemów hydrofitowych, jest zaprojektowanie i wykonanie instalacji działającej na terenie oczyszczalni ścieków mleczarskich w Wysokim Mazowieckiem (Dąbrowski 2009; Dąbrowski, 2011b,c). W badaniach zastosowano układ hybrydowy składający się ze złoża o przepływie pionowym (VF-CW) oraz poziomym (HF-CW). Oczyszczaniu hydrofitowemu poddano ścieki uzyskane po komorze defosfatacji i komorze osadu wysokoobciążonego. W celu zidentyfikowania efektywności układu hybrydowego, dokonano pomiaru wartości wskaźników przed i po oczyszczeniu. Średnia wartość wynosiła: BZT₅ (234,1 mg O₂ · d⁻³), ChZT (332,8 mg O₂ · d⁻³), azot mierzony metodą Kjeldahla (25,9 mg N_{TKN} · d⁻³), azot amonowy (13,9 mg N-NH₄ · d⁻³), fosfor całkowity (10,9 mg P_T · d⁻³). Zastosowanie złożów hydrofitowych pozwoliło na efektywny spadek wartości wskaźników: BZT₅ o 84,8%, ChZT 85,3 %, azotu mierzzonego metodą Kjeldahla 81,0 %, azotu amonowego 91,0 % i fosforu ogólnego 39 %. Zredukowana wartości wskaźników stanowi dowód wysokiej przydatności wykorzystania metody hydrofitowej w oczyszczaniu ścieków mleczarskich po stopniu mechanicznym i biologicznym oczyszczania ścieków mleczarskich (Dąbrowski 2009; Dąbrowski, 2011b,c).

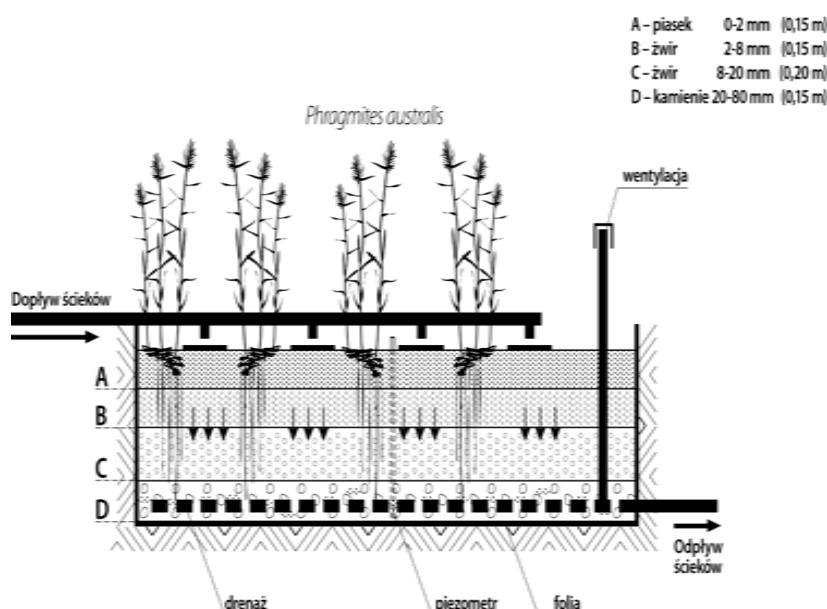


Projekt „Naukowcy dla gospodarki województwa łódzkiego”
współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Przykładowa charakterystyka instalacji badawczej w Wysokim Mazowieckiem

Wysokie Mazowieckie: zastosowano 2 instalacje ze złożami pionowymi oraz 1 instalację hybrydową
Złoże pionowe „A”

- Powierzchnia 10 m²
- Obciążenie ładunkiem 55 g ChZT m² · d⁻¹ ; 13 g BZT₅ m² · d⁻¹; 0,8 g N-NH₄ · m² · d⁻¹
- Obciążenie hydrauliczne od 100 do 200 mm d⁻¹
- Przepływ od 1 do 2 m³ d⁻¹
- Głębokość wypełnienia- 0.65 m
- Ilość warstw wypełnienia - 4
- Złoże zasiedlone sadzonkami *Phragmites australis* (gęstość 5 roślin/m² , sadzonki 3-letnie)



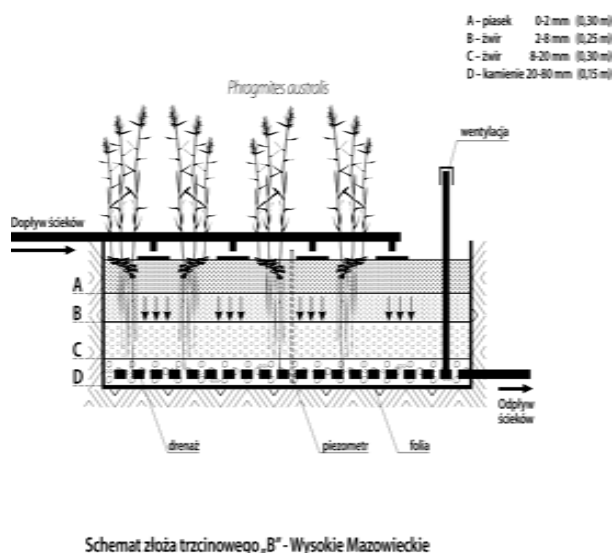
Schemat złoży trzcinowego „A” - Wysokie Mazowieckie

Złoże pionowe „B”

- Powierzchnia 5 m²
- Obciążenie ładunkiem 21 g ChZT m² · d⁻¹ ; 6,5 g BZT₅ m² · d⁻¹; 2,1 g N-NH₄ · m² · d⁻¹
- Obciążenie hydrauliczne od 100 do 200 mm d⁻¹
- Przepływ od 1 do 2 m³ d⁻¹
- Głębokość wypełnienia- 1,00 m
- Ilość warstw wypełnienia - 4
- Złoże zasiedlone sadzonkami *Phragmites australis* (gęstość 5 roślin/m² , sadzonki 3-



letnie)



EFEKT- złożo pionowe „A” i „B”

parametr	wlot	out „A”	out „B”	efekt „A”	efekt „B”
BOD ₅ mgO ₂ /l	108	9,5	8,2	91 %	92%
COD mgO ₂ /l	211	69	57	67 %	72 %
TOC mgC/l	39	5	4	87 %	89
N-TKN mgN/l	28	6,6	5,3	76 %	81 %
N-NH ₄ mgN/l	20	1,7	1,9	91 %	90 %
P-total mgP/l	7,4	5,0	4,6	32 %	37%
SS mg/l	107	6,8	6,0	93%	94%

Rys. 1 Schemat złoża trzcinowego pionowego A i B z wykorzystaniem *Phragmites australis*, oraz efekty oczyszczania ścieków mleczarskich w zakładzie w Wysokie Mazowieckie. Zgłoszenie patentowe: W. Dąbrowski „Określenie przydatności złożów hydrofitowych do oczyszczania odcieków z tlenowej przeróbki osadów w oczyszczalniach ścieków mleczarskich”, Politechnika Białostocka 2009.

5. Oczyszczalnie ścieków typu LEMNA SYSTEM

Oczyszczalnia typu LEMNA SYSTEM powstała w 1985 roku w Stanach Zjednoczonych i posiada patent technologii innowacyjno-alternatywnej wydany przez Agencję Ochrony Środowiska w USA. Jest to nowa generacja oczyszczalni ścieków wykorzystująca energię słoneczną i rośliny wodne z rodziny Lemnaceae. W tej technologii główną rolę pełni rzęsa wodna (*Lemna minor*), w Polsce powszechnie nazywana kaczym zielem. Metoda ta została sprawdzona w zróżnicowanych szerokościach geograficzno-klimatycznych i umożliwia oczyszczanie ścieków, aż do osiągnięcia śladowych ilości zanieczyszczeń na odpływie, w tym metali ciężkich. W Polsce istnieją realizacje oczyszczalni hydrofitowych typu LEMNA SYSTEM i prowadzony jest w nich proces oczyszczania ścieków. Oczyszczalnie te znajduje się w Świerklańcu, Dobrodzieniu, Pawonkowie oraz Kochcicach (<http://www.rpm.com.pl/rpm/index.php?kolektory-sanitarne-i-oczyszczalnie-ściekow,38>; Obarska-Pępkowiak i in. 2010)



Oczyszczalnia ścieków Lemna w Gomunicach, jest jednym z wielu tego typu obiektów, który został oddany do eksploatacji w Polsce. W oczyszczalni są wydzielone dwie części: mechaniczna i biologiczna. Część mechaniczna składa się z: kraty mechanicznej schodkowej gęstej, piaskownika wirowego oraz punktu zlewnego z kratą rzadką i pompowni ścieków surowych. W części biologicznej znajdują dwa stawy: napowietrzany oraz Lemna. Pomędzy stawami zlokalizowano komorę nityfikacji zespoloną z komorą koagulacji z dozownikiem krystalicznego siarczanu glinu, który w okresie zimowym jest używany do strącania związków fosforu (P.U.H. Eko-Eksploatacja, 2007).

Podsumowanie

Hydrofitowe oczyszczalnie ścieków mogą z powodzeniem być użyteczne w oczyszczaniu ścieków mleczarskich pod warunkiem prawidłowego ich zaprojektowania i poprawnej eksploatacji. Przy projektowaniu, należy wziąć pod uwagę wielkość i oscylacje ładunku dopływającego, co determinuje powierzchnię złoża hydrofitowego i wytypowanie odpowiednich gatunków roślin. Przed wyborem metody oczyszczania konieczny jest etap monitorowania składu odcieków (nie można opierać się wyłącznie na danych literaturowych z innych składowisk). Niezbędna jest ścisła współpraca inżynierów projektantów i wykonawców ze specjalistami w zakresie chemii i ekofizjologii roślin.

Bibliografia

Anielak A.M. 2008. Gospodarka wodno ściekowa przemysłu mleczarskiego, *Agro Przemysł*, 2, 57-59.

Bartkiewicz 2006. Oczyszczanie ścieków przemysłowych, PWN W-wa, 2006.

Bartkiewicz i Umiejewska 2010. Oczyszczanie ścieków przemysłowych, PWN. W-wa 2010.

Bruch, I., Fritsche, J., Bänninger, D., Alewella, U., Sendelov, M., Hürlimann, H., Hasselbach, R., Alewell, C., 2011. Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource Technology* 102, 937-941.

Bugajski P. 2006. Hydrobotaniczne (hydrofitowe) oczyszczalnie ścieków. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Błękitny San”, Dubiecko 21-22. 04. 2006, s 93-99.

Bulc T.G., 2006. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering* 26: pp. 365-374.

Chen, Y., Wen, Y., Cheng, J., Xue, C., Yang, D., Zhou, Q., 2011. Effects of dissolved oxygen on extracellular enzymes activities and transformation of carbon sources from plant biomass: implications for denitrification in constructed wetlands. *Bioresource Technology* 102, 2433-2440.



Dąbrowski W. 2009. Skuteczność oczyszczania ścieków mleczarskich w systemach hydrofitowych. II Ogólnopolska Konferencja Naukowa: Mokradła i Ekosystemy słodkowodne – funkcjonowanie, zagrożenie i ochrona, Augustów 2009; s. 29-30.

Dąbrowski W. 2011a. Efektywność złóż hydrofitowych w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. Society of Ecological Chemistry and Engineering; Ecological Chemistry and Engineering A. Opole; Vo1. 18, No 2, s.175-183.

Dąbrowski W. 2011b. Niskonakładowa i bezreagentowa metoda oczyszczania odcieków z przeróbki osadów w oczyszczalniach mleczarskich. Politechnika Białostocka.

Dąbrowski W. 2011c. Określenie zmian stężenia zanieczyszczeń w profilu oczyszczalni ścieków mleczarskich na przykładzie S.M. Mlekovita w Wysokiem Mazowieckiem. Inżynieria Ekologiczna Nr 24: s 236-242.

Filipkowska Z., 2003. Sanitary and bacteriological aspects of sewage treatment. Acta Microbiol. Polon. 52 s. 57–66.

Fountoulakis, M., Terzakis, S., Chatzinotas, A., Brix, H., Kalogerakis, N., Manios, T., 2009. Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment. Science of the Total Environment 407, 2996-3003.

<http://www.rpm.com.pl/rpm/index.php?kolektory-sanitarne-i-oczyszczalnie-sciekow.38>;

Jezińska-Tys S., M. Frąc 2008. Badania nad wpływem osadu z oczyszczalni ścieków mleczarskich na aktywność mikrobiologiczną i biochemiczną gleby. Acta Agrophysica 160 No 3: s 1-109.

Kadlec R.H., Knight R.L. 1996. Treatment wetlands. Boca Raton, FL, USA: Lewis – CRC Press: 893.

Kadlec R.H., 2003. Integrated natural systems for landfill leachate treatment, Wetlands – nutrients, metals and mass cycling, Vymazal J, (Ed.) Backhuys Publishers, Leiden : pp. 1-33.

Konieczny J. S. Lewak 2007. Fizjologia roślin. Wyd. PWN, W-wa.

Kowalik P., Slater F.M., Randerson P., 1996. Constructed wetlands for landfill leachate treatment. W: Thofelt L., Englund A. (eds.) Ecotechnics for a sustainable society. Proceeding from Ecotechnics 95 – International Symposium on Ecological Engineering., chapter 16: pp. 189-200.

Lalke-Porczyk E., M. Świętek-Brzezinska, W. Konderski 2010. Rola oczyszczalni hydrobotanicznych w oczyszczaniu ścieków z terenów wiejskich. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie; 2010: t. 10 z. 3 (31), s. 119–127.

Lee, S., Maniquiz, M.C., Kim, L.H., 2010. Characteristics of contaminants in water and sediment of a constructed wetland treating piggyery wastewater effluent. Journal of Environmental Sciences 22 (6), 940e945.

Maehlum T., 1998. Wetlands for treatment of landfill leachates in cold climates. In: Mulamootil, G., McBean, E.A., Rovers, F. (Eds), Proc. of the Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. CRC Lewis Publishers, NY, USA, pp. 33-46.

Mańczak M, Balbierz m., Szetela M. 1987. Ochrona Środowiska 521/1 (31): s 29-31.

Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., 2010a. Hydrofitowe oczyszczalnie wód i ścieków. Wyd. PWN, W-wa.

Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., 2010b. Application of vertical flow constructed wetland for highly contaminated wastewater treatment: preliminary results. Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands J. Vymazal (Ed), Springer Science+Business Media B.V. chapter 4: pp. 37-51.



Projekt „**Naukowcy dla gospodarki województwa łódzkiego**”
współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Ozimek T., 2009. Wykorzystanie roślin do oczyszczania odcieków z wysypisk odpadów. Wiadomości Ekologiczne, Tom LV, Zeszyt 2: s 61-74.

P.U.H. Eko-Eksploracja: Charakterystyka ilościowa i jakościowa osadów ze stawu napowietrzanego i Lemna oczyszczalni ścieków systemu „Lemna” w Gomunicach oraz możliwość jego usunięcia i zagospodarowania. Stare Miasto 2007.

Peverly J.H., Surface J.M., Wang T., 1995. Growth and trace metals absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment. Ecological Engineering 5: pp. 21-35.

Sadecka Z., 2003. Ocena efektywności pracy wybranych oczyszczalni hydrobotanicznych. Ochrona Środowiska, 25, (1): 13-16.

Sadecka Z., 2011. Weryfikacja danych do modernizacji oczyszczalni ścieków. Forum Eksploatatora, 3: 58-62.

Sim, C.H., Yusoff, M.K., Shutes, B., Ho, S.C., Mansor, M., 2008. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. Journal of Environmental Management 88 (2), 307-317.

Struk-Sokołowska J. 2011. Wpływ ścieków mleczarskich na frakcje ChZT ścieków komunalnych. Inżynieria Ekologiczna Nr 24; s. 130-144.

Tomczuk B., Dąbrowski W. 2011. Problems of Management and Environmental Protection, No. 8, 2011 „*Environment Alterations – Research and Protection Methods*” Rozdz. 8. s 171-184.

Wojciechowska E., Gajewska M., Obarska – Pempkowiak H., 2010. Treatment of Lanfill Leachate by Constructed Wetlands: Three Case Studies, Polish J. of Environ. Stud..19 (3): pp. 643-650.

Wojciechowska E. 2011. Doświadczenia z eksploatacji pilotowej hydrofitowej. Oczyszczalni odcieków ze składowiska odpadów komunalnych w zależności od reżimu hydraulicznego. Inżynieria Ekologiczna Nr 25, 2011, s 176-188.

Xinshan, S., Qin, L., Denghua, Y., 2010. Nutrient removal by hybrid subsurface flow constructed wetlands for high concentration ammonia nitrogen wastewater. Procedia Environmental Sciences 2, 1461-1468.

Ye Z., Baker AJ., Wong MH., Willis AJ., 1997. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. Ann Bot: pp. 363-370.