

**ALTERNATYWNE METODY OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW MLECZARSKICH
HYDROFITOWE OCZYSZCZALNIE**

Streszczenie

Przemysł mleczarski w Polsce generuje około 92000 m³ ścieków mleczarskich na dobę. Dla oczyszczania tego typu ścieków stosowane są konwencjonalne instalacje, takie jak bioreaktory membranowe. Naturalna technologia oczyszczalni hydrofitowej skojarzona ze strategią fitoremediacji jest najbardziej efektywną metodą w oczyszczaniu ścieków. Jest to proces biologiczny zachodzący we współpracy z mikroorganizmami heterotroficznymi oraz roślinami. Oczyszczalnie hydrofitowe posiadają zdolność usuwania substancji organicznych, azotu, fosforu oraz innych zanieczyszczeń w tym metali ciężkich. Metoda hydrofitowa może stanowić alternatywę dla zaawansowanych i kosztownych technologii i w oczyszczaniu ścieków mleczarskich.

Słowa kluczowe

ścieki mleczarskie, oczyszczalnie hydrofitowe, fitoremediacja, rośliny wodne, metale ciężkie

Ścieki źródłem 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 związek organiczne i nieorganiczne 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** [1]. 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 [2]. 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 [3],[4], [5].

Generowanie ścieków mleczarskich jest spowodowane m. in. poprzez mycie urządzeń, rozlanie mleka, maślanek, serwatki oraz mleko paszowe i może mieć negatywny wpływ na środowisko ze względu na wysokie BZT5, ChZT, TSS (cząsteczki zawiesiny ogólnej) i składniki odżywcze, takie jak fosfor i azot, które powodują eutrofizację wód.

Dla oczyszczania ścieków mleczarskich, zwykle stosowane są konwencjonalne instalacje, które powodują wiele problemów i są uciążliwe oraz nie opłacalne. W rzeczywistości, w sezonie powodziowym wymywanie ścieków powoduje nagły spadek lokalnego poziomu rozpuszczonego tlenu w wodzie rzek, co w konsekwencji może prowadzić do masowego śnięcia ryb [6], [7]. 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 powinien być stały monitoring parametrów jakości ścieków w całym profilu produkcyjnym oczyszczalni, który

będzie umożliwiał korygowanie pracy urządzeń. Poszukiwanie optymalnej i przyjaznej dla środowiska metody kontroli zanieczyszczenia wody doprowadziło do ponownego zainteresowania oczyszczalniami hydrofitowymi.

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

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

Źródło: Bartkiewicz 2006 [8]

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

Tab. 2. Wartości koncentracji zanieczyszczeń w ściekach mleczarskich ogólnych.

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

Źródło: Bartkiewicz 2006 [8]

Tab. 3. Skład ścieków mleczarskich w zależności od rodzaju produkcji

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
Utlenialność, 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

Źródło: Bartkiewicz 2006 [8]

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 [9].

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 wychwytywaniu 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.

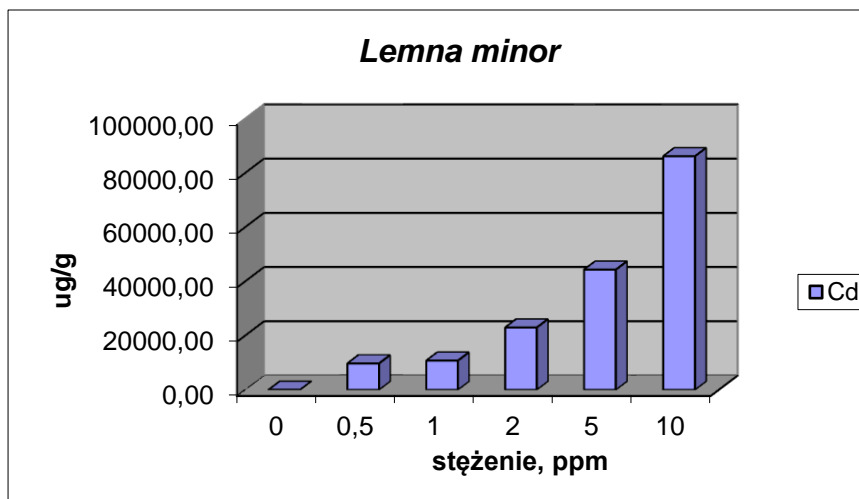
Pierwsze udane próby wykorzystania fitoremediacji do rolniczego zagospodarowania ścieków komunalnych miały miejsce w Niemczech już na początku XIX wieku. Od dawna doceniana jest także rola roślin w oczyszczaniu powietrza wielkich aglomeracji miejskich, chociaż największe zainteresowanie tą metodą i pierwsze 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 następujące 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.)**, turzycza 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 [10].

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. Do tego typu technologii mogą z powodzeniem być wykorzystywane rośliny wodne z rodziny *Lemnaceae* (*Lemna minor*, *Spirodela polyrrhiza*, *Spirodela oligorrhiza*).



Rys. 1. Absorpcja kadmu (Cd) przez rośliny *Lemna minor*. Stężenia w zakresie 0-10 ppm. (Źródło: badania własne)



Fot. 1. *Lemna minor* i *Spirodela polyrrhiza* hodowane w kulturach *in vitro* z wykorzystaniem ścieków mleczarskich (Źródło: foto. Z. Romanowska-Duda)

Zaletą fitoremediacji jest 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. Dodatkowym atutem fitoremediacji jest możliwość uzyskania biogazu z roślin wykorzystanych w tej technologii [11].

Wadą fitoremediacji 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. Odminną kwestią do rozwiązania jest deponowanie i usuwanie roślin akumulujących toksyczne zanieczyszczenia [10].

W ostatnich latach metoda oczyszczalni hydrofitowych, jest z powodzeniem wykorzystywana do oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Działanie systemów hydrofitowych jest wzorowane na naturalnych ekosystemach podmokłych, tzw. wetlandach [20]. Systemy te, podobnie jak występujące w przyrodzie siedliska roślin bagiennych, mają zdolność do rozkładu i zatrzymywania zanieczyszczeń [21]. 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 gradiencie 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 zakorzonioną, roślinnością wodną pływającą i oczyszczalnie wierzbowe.

Złoża 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 zakorzonione lub pływające rośliny, żwir i ziemię do masowego oczyszczania ścieków [9], [15]. 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 [22]; [23]; [24]. Różnorodność procesów biochemicznych zachodzących w tych systemach zapewnia usuwanie nie tylko substancji organicznej i związków azotu, ale również zanieczyszczeń specyficznych, ze stabilną, wysoką skutecznością [25], [16], [19], [21].

Najczęściej stosowane rośliny naziemne w oczyszczalniach hydrofitowych to takie, które mają rozbudowany system kłączy 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 moczka trzcinowa – *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*, *Spirodela intermedia*, hiacynt wodny – *Eichhornia crassipes* [26].

W badaniach Basílico i wsp. (2013) [27] wykazali, że *Spirodela intermedia* może być stosowana do usuwania znacznych ilości amoniaku (TN; *total nitrogen*) i fosforu (TP; *total phosphorus*) ze ścieków. W przypadku zastosowania metody fitoremediacji *in situ* z wykorzystaniem roślin z rodziny *Lemnaceae*, należy rozważyć również regularne zbiory biomasy roślinnej w celu uniknięcia uwalniania fosforu. W tab. 4 i 5 zamieszczono wartości współczynnika usuwania fosforu przez *Spirodela intermedia* oraz zmiany w przyroście biomasy roślin.

Tab. 4. Współczynnik usuwania fosforu (%R ±SD) mierzony w wariancie (A) z *Spirodela intermedia* i (B) bez wykorzystania roślin

Zmienna	Traktowanie	%R	Fosfor (P)
N-NH ₄	A	98,1 ± 0,8	0,002*
	B	57,4 ± 11,4	
DIN	A	53,0 ± 11,9	0,344
	B	57,2 ± 11,4	
TP	A	15,4 ± 2,3	0,016*
	B	9,7 ± 2,7	
TOC	A	67,9 ± 11,6	0,222
	B	60,5 ± 9,9	
DOC	A	68,5 ± 12,7	0,085
	B	50,0 ± 14,2	
POC	A	67,5 ± 11,7	0,208
	B	55,7 ± 17,2	

*Różnice pomiędzy %R, obydwu traktowań A i B (p<0,05); Student test

Źródło: Basílico i wsp. [27].

N-NH₄⁺ - całkowity amon (*total ammonium*)
 DIN – rozpuszczony azot nieorganiczny (*dissolved inorganic nitrogen*)
 TP – totalny fosfor (*total phosphorus*)
 TOC - całkowity węgiel organiczny (*total organic carbon*)
 DOC – rozpuszczalny węgiel organiczny (*dissolved organic carbon*)
 POC - cząstkowy organiczny węgiel (*particulates organic carbon*)

Tab. 5. Zmiany biomasy traktowanej ściekami mleczarskimi (±SD)

Warianty	Biomasa				
	Inicjująca biomasa (g/m ²)	Finalna biomasa (g/m ²)	Przyrost biomasy (g/m ²)	Produkcja biomasy (g/m ² dzień)	Współczynnik wzrostu (RGR) (g/g dzień)
Świeża masa (FW)	464±0	514±6	50±6	8±1	0.017
Sucha masa (DW)	35.6±0.4	37.9±0.7	2.2±0.7	0.4±0.1	0.010

Źródło: Basílico i wsp. [27].

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 [21], [28], [29]. Przykładem istniejącej tego typu oczyszczalni ścieków mleczarskich jest obiekt znajdujący się w Wysokim Mazowieckiem [2] [31] [32]. 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 [33], [34].

Tab. 6. Efektywności oczyszczania dla obiektów hydrofitowych oczyszczających odcieki ze składowisk odpadów wg danych literaturowych

Nazwa obiektu, kraj, literatura	Konfiguracja	Efektywność usuwania zanieczyszczeń [%]			
		BZT 5	ChZT	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 złoża HSSF staw hydrofitowy	93-99		90-94	97-99
Isatra, Szwecja	zbiornik wyrównawczy reaktor SBR zbiornik wyrównawczy obszar zalewowy złoża HSSF	82	40	77	99
Órebro, Szwecja	staw napowietrzający system 10 stawów hydrofitowych (FWS)	95	68	91	94
Chlewnica, Polska	VSSF-1+VSS-2+HSSF	95* 95**	87* 48**	98* 86**	99* 94**

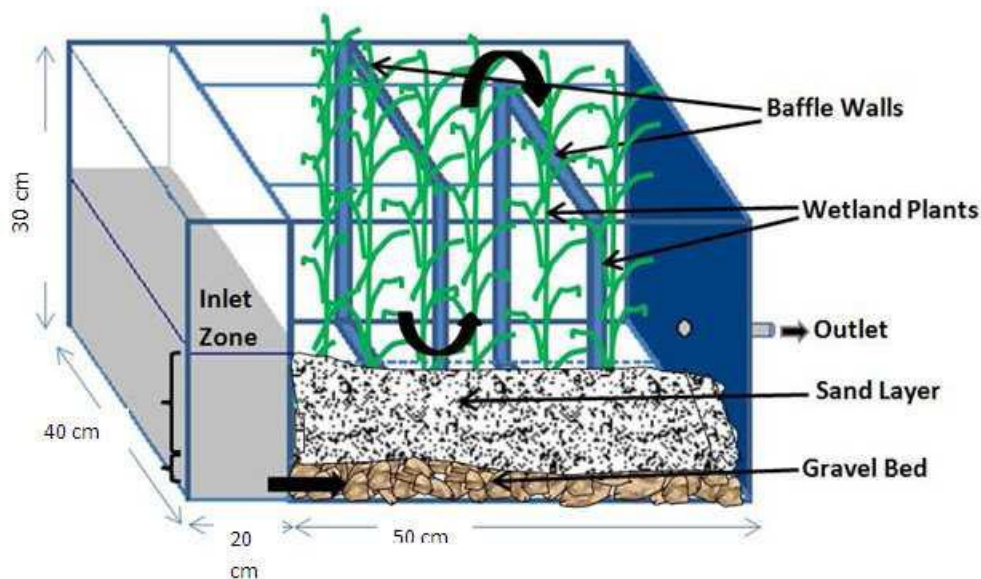
* Pierwszy rok eksploatacji, ** Drugi rok eksploatacji

Źródło: Wojciechowska 2011[34]

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 [35]. 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 [36]; [37]. Dodatkowo nieprzetworzona materia organiczna często wyczerpuje rozpuszczony tlen (DO), co prowadzi do śmierci organizmów wodnych. Jakość ścieków poddawanych oczyszczaniu i doczyszczaniu w złożach roślinnych uległa znacznej poprawie. W pracy Lalke-Porczyk i in. 2010 [28] 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 [38], [39]. 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 została pomniejszona liczebność paciorkowców kałowych. W oczyszczalni wierzbowej liczebność bakterii tej grupy została zredukowana 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 [28].

Mechanizmy przemian związków w systemach hydrofitowych

Oczyszczalnie hydrofitowe są wzorowane na systemach, określanymi, jako 'constructed Wetland' i są rozpowszechnione w Europie Zachodniej oraz USA, natomiast w znacznie mniejszym zakresie w Polsce. Dla małej oczyszczalni ścieków, koszty skonstruowania oczyszczalni botanicznych (wetlandów) są ekonomiczne. Tereny projektowane są w systemach, które zostały przystosowane do wykorzystania naturalnych procesów roślin, gleby i mikroorganizmów przy oczyszczaniu skażonej wody. Niskie koszty utrzymania „wetlandów” powodują, że są przyjazne dla środowiska oraz posiadają zdolność do usuwania różnych zanieczyszczeń, w tym metali ciężkich, składników mineralnych i innych mikrozanieczyszczeń. Korzystny efekt działania tych konstrukcji odnotowano w wielu krajach, m. in. w Kanadzie (Ontario), Irlandii i Indii [40], [41], [42], [43] [44]. Oczyszczalnia typu „constructed wetland” na ogół składa się z basenu lub kanału z zaporą wypełnionego medium na odpowiednią głębokość, aby zapobiec wyciekom z koryt. Medium w postaci ścieków zaopatruje korzenie roślinne w makro i mikroelementy. Dlatego w oczyszczalniach roślinnych stwarza się naturalne warunki, przez ok. 12 dni w celu wzrostu obsadzonych gatunków roślin, takich jak np. *Typha*, *Pistia* sp, *Eichhornia* sp, *Salvinia* sp. ,a także roślin wodnych z rodziny *Lemnaceae* [44].



Rys. 2. Przykładowa konstrukcja „wetlandów” wg Sudarsan. i wsp. (2012.)

Źródło: Sudarsan. i wsp. (2012.) [45]

Zastosowanie tego typu fitotechnologii spowodowało znaczną redukcję zawartości poszczególnych parametrów ścieków w tym zmniejszenie BZT o 73%, azotu amonowego o 26%, substancji stałych 75-83% i fosforu o 75,7%. W tab. 7 zamieszczono wartości parametrów określających redukcję zanieczyszczeń ścieków mleczarskich przy wykorzystaniu roślin *Typha latifolia*.

Tab. 7. Wartości parametrów (% redukcji) po zastosowaniu roślin *Typha latifolia* w procesie oczyszczania ścieków mleczarskich

Dzień / Parametr (% redukcji)	Dzień - 0	Dzień- 12
pH	9.54	7.4
BZT mg/l	95	25
ChZT mg/l	365	270
Całkowita zawartość substancji stałych mg/l	583	113
Łączna frakcja ciał stałych zawieszonych w wodzie (TSS) mg/l	261	42
Łącznie substancje rozpuszczone (TDS) mg/l	376	94
Łącznie ciała lotne (TVS) mg/l	368	89
Dostępny azot (AN) mg/l	76	56
Fosfor (P) mg/l	2.14	0.52

Źródło: Sudarsan J. S. i wsp. 2012.(zmienione)[45]

Dipu i wsp. (2010) [44] porównali efektywność 3 gatunków roślin z grupy makrofitów wodnych (*Typha sp.*, *Eichhornia sp.*, *Salvinia sp.* i *Pistia sp.*) w procesie fitoremediacji i wykazali ich wysoką wydajność w oczyszczaniu ścieków mleczarskich w zastosowanych oczyszczalniach hydrofitowych. Dowiedziono znaczną redukcją: biologicznego zapotrzebowania na tlen (BZT), chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT), zmętnienia, zawartości składników odżywczych ($p < 0,01$) po zastosowaniu makrofitów wodnych, a zwłaszcza roślin *Typha sp.*, gdzie system usuwania zanieczyszczeń ze ścieków był najbardziej skuteczny.

W badaniach podjęto ocenę porównawczą, efektywności chwastów wodnych jak *Typha sp.*, *Eichhornia sp.*, *Salvinia sp.* i *Pistia sp.* Ścieki próbek pobranych z systemu oczyszczającego analizowano okresowo w celu sprawdzenia zmian ich właściwości fizyko-chemicznych spowodowanych przez wspomniane 3 gatunki roślin. Analizowano właściwości fizyczne - chemiczne próbek ścieków, m.in. zmiany pH, mętność, przewodność, ogólną zawartość substancji stałych, sodu, potasu, azotu i azotanów, zasolenie, BZT, ChZT i metali ciężkich. PH wydaje się być najważniejszym parametrem w procesie biosorpcji, co wpłynęło na ilość zaabsorbowanych metali ciężkich, działalność grup funkcyjnych w biomasie i konkurencji z jonami metali. Wartość pH próbek wody po zastosowaniu zespołów roślinnych: *Eichhornia sp.*, *Salvinia sp.*, *Pistia sp.*, *Typha sp.* zmniejszyła się z alkalicznej na prawie neutralną przez działanie organizmów roślinnych, co może być interpretowane, że obniżenie tego parametru było spowodowane absorpcją zanieczyszczeń przez rośliny [46, 47]. Proces fitoremediacji spowodował zmniejszoną mętność wody [48]. Gudekar i Trivedi [49] dowiedli redukcji 59,54% zmętnienia wody podczas oczyszczaniu odpadów przemysłu maszynowego przy wykorzystaniu hiacynta wodnego.

Całkowita ilość substancji stałych była znacznie zmniejszona we wszystkich frakcjach ścieków mleczarskich przez okresowe zastosowanie 3 gatunków roślin. Maksymalna redukcja zanieczyszczeń w gęstych ściekach wynosiła 516,7%, a rozcieńczonych 329,4% w fitooczyszczalni z zastosowaniem *Typha sp.* Wykazany spadek zanieczyszczeń był znacznie większy niż obserwowany przez Vymazal, [50] i Simon i Silhol, [51], gdzie całkowita ilość cząstek stałych została obniżona do 50,64% po 15 dniach traktowania roślinami. Maksymalne wykorzystanie azotanów w ilości 155,5% obserwowano w oczyszczalni bazującej również na *Typha sp.* [52]. Ghaly in. [53], i Simon i Silhol [51] stwierdzili, redukcję azotu azotanowego od 82,9 do 98,1% w ściekach przy zastosowaniu fitooczyszczalni. Pośród badanych pływających roślin (*Eichhornia sp.*, *Salvinia sp.* i *Typha sp.*), stwierdzono, że najbardziej skuteczną w oczyszczaniu ścieków przemysłowych, a zwłaszcza w wychwytywaniu metali ciężkich, okazała się *Typha sp.*, Wyniki badań sugerują, że znaczne zmniejszenie zawartości zanieczyszczeń w ściekach mleczarskich traktowanych roślinami wodnymi może być wynikiem wielu właściwości fitoremediacyjnych roślin. Rośliny wodne mają unikalną cechę transportu tlenu z nadziemnych części roślin do zanurzonych w wodzie [54]. Transfer tlenu przez rośliny wodne do strefy korzeniowej odgrywa

znaczącą rolę we wspieraniu wzrostu bakterii tlenowych i w konsekwencji degradacji węgla w ściekach [55]. Obniżenie pH wzmacnia działanie mikroorganizmów w rozkładzie BZT i ChZT. Zmniejszenie wartości ChZT i BZT może prowadzić do wzrostu stężenia rozpuszczonego tlenu w ściekach [20].

Podsumowując, można stwierdzić, że przyszłość fitoremediacji jest wciąż w fazie badań i rozwoju, a istnienie wielu barier technicznych, prowokuje do poszukiwania nowych rozwiązań. Zrozumienie mechanizmów i procesów rządzących usuwaniem zanieczyszczeń, zwiększa prawdopodobieństwo sukcesu aplikacji oczyszczalni roślinnych. Technologia „wetlandów” skojarzona ze strategią fitoremediacji jest najbardziej efektywną metodą. Oprócz poprawy jakości wody i oszczędności energii, fitooczyszczalnie mają także inne funkcje, związane z ochroną środowiska, takie jak wspieranie różnorodności biologicznej poprzez zapewnienie schronienia dla ptaków i gadów, działanie proklimatyczne (redukcja CO₂), funkcje hydrologiczne, biokumulacji i biometylacji metali ciężkich [56], [57].

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, sedimentacji 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 biogennych 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 [21], [29].

Efektywność oczyszczania ścieków mleczarskich w systemach hydrofitowych

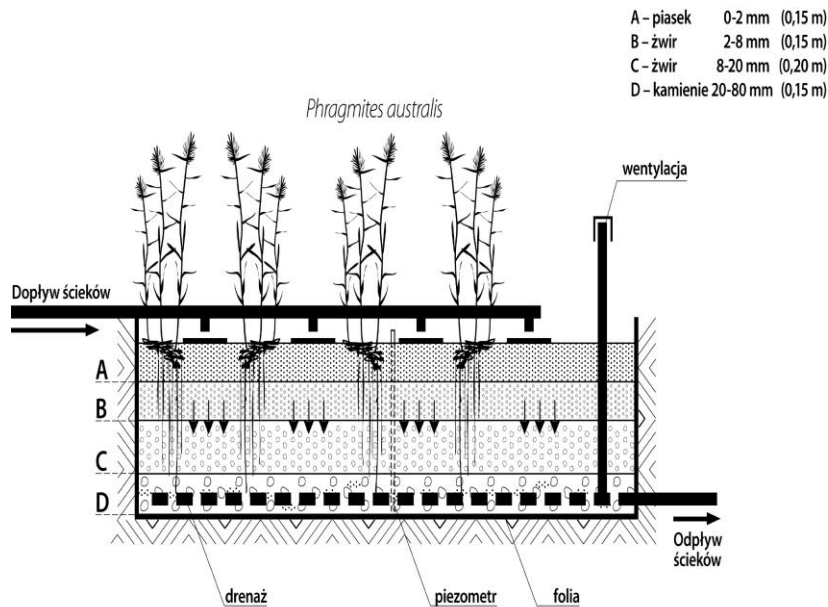
W kraju w latach 70-tych na terenie Polski rozpowszechniła się technologia oczyszczania ścieków mleczarskich „Promlecz”. Większość tego typu oczyszczalni wymaga niezbędnej modernizacji z powodu ich stanu technicznego i zmniejszone możliwości wydajności oczyszczania ze względu na wzrost produkcji w zakładach, 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 [21], [29], [58], [59], [60].

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 biogennych [31], [32], [59], [60]. Przykładem pomyślnego zastosowania systemów hydrofitowych, jest zaprojektowanie i wykonanie instalacji działającej na terenie oczyszczalni ścieków mleczarskich w Wysokim Mazowieckiem [59], [60], [61]. 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 złoża hydrofitowych pozwoliło na efektywny spadek wartości wskaźników: BZT₅ o 84,8%, ChZT 85,3 %, azotu mierzonego metodą Kjeldahla 81,0 %, azotu amonowego 91,0 % i fosforu ogólnego 39 %. Zredukowane wartości wskaźników stanowią dowód wysokiej przydatności metody hydrofitowej w oczyszczaniu ścieków mleczarskich po stopniu mechanicznym i biologicznym oczyszczania tych ścieków [59], [60] [61].

Przykładowa charakterystyka instalacji badawczej w Wysokim Mazowieckiem

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

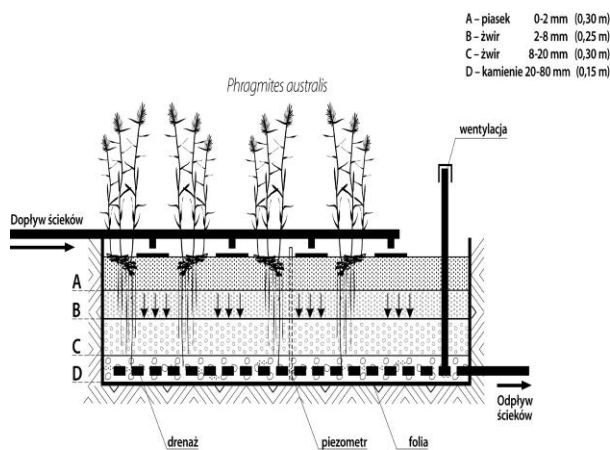
- Powierzchnia 10 m²
- Obciążenie ładunkiem 55 g ChZT m² · d⁻¹ ; 13 g BZT₅ m² · d⁻¹; 0,8 g N-NH₄ · m² · d⁻¹
- Obciążenie hydrauliczne od 100 do 200 mm d⁻¹
- Przepływ od 1 do 2 m³ d⁻¹
- Głębokość wypełnienia- 0.65 m
- Ilość warstw wypełnienia - 4
- Złoże zasiedlone sadzonkami *Phragmites australis* (gęstość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



Schemat złoża trzcinowego „B” - Wysokie Mazowieckie

Rys. 3. Schemat złoża trzcinowego pionowego A i B z wykorzystaniem *Phragmites australis*, oraz efekty oczyszczania ścieków mleczarskich w zakładzie w Wysokie Mazowieckie.

Źródło: Zgłoszenie patentowe: W. Dąbrowski „Określenie przydatności złóż hydrofitowych do oczyszczania odcieków z tlenowej przeróbki osadów w oczyszczalniach ścieków mleczarskich”, Politechnika Białostocka 2009.

Tab. 8. Zestawienie wartości efektów oczyszczania ścieków mleczarskich w zakładzie w Wysokie Mazowieckie

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%

Źródło: Zgłoszenie patentowe: W. Dąbrowski „Określenie przydatności złóż hydrofitowych do oczyszczania odcieków z tlenowej przeróbki osadów w oczyszczalniach ścieków mleczarskich”, Politechnika Białostocka 2009.

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 Świerkłańcu, Dobrodzieniu, Pawonkowie oraz Kochcicach [21], [29], [64], (<http://www.rpm.com.pl/rpm/index.php?kolektory-sanitarne-i-oczyszczalnie-ścieków>) 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.

Pomiędzy stawami zlokalizowano komorę nityfikacyjną, zespoloną z komorą koagulacji z dozownikiem krystalicznego siarczanu glinu, który w okresie zimowym jest używany do strącania związków fosforu [63]

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

- [1] j. Struk-Sokołowska, Wpływ ścieków mleczarskich na frakcje ChZT ścieków komunalnych. Inżynieria Ekologiczna 2011, Nr 24; s. 130-144.
- [2] W. Dąbrowski, Efektywność złóż hydrofitowych w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. Society of Ecological Chemistry and Engineering 2011a; A. Opole; Vo1. 18, No 2, s.175-183.
- [3] A. M. Anielak, Gospodarka wodno ściekowa przemysłu mleczarskiego, Agro Przemysł 2008, 2, 57-59.
- [4] JB. Bartkiewicz i A. Umiejewska, Oczyszczanie ścieków przemysłowych, PWN. W-wa 2010.
- [5] W. Dąbrowski, J. Wiater 2013. Określenie możliwości zmniejszenia obciążenia oczyszczalni ścieków mleczarskich przez zastosowanie wydzielonego oczyszczania odcieków z przeróbki osadów. Rocznik Ochrona Środowiska, Tom 15. 823–834.
- [6] S. Raudiansky, The Covenant of the Wild. New York: William Morrow and Company, Inc, 1992, pp.10-50.
- [7] K. Maesoon N., Some problems associated with brewery and dairy water discharges, Environment International, 12(5): 563–569, (1986).
- [8] B. Bartkiewicz 2006. Oczyszczanie ścieków przemysłowych, PWN W-wa, 2006.
- [9] R.H Kadlec., R. L. Knight, 1996. Treatment wetlands. Boca Raton, FL, USA: Lewis – CRC Press: 893.
- [10] J. Kopcewicz, S. Lewak 2007. Fizjologia roślin. Wyd. PWN, W-wa.
- [11] V.K. Verma, Y.P. Singh, J.P.N. Rai 2007. Biogas production from plant biomass used for phytoremediation of industrial wastes. Bioresource Technology 98 (2007) 1664–1669.
- [12] J. H. Peverly, J. M. Surface, T. Wang, Growth and trace metals absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment. Ecological Engineering 1995, .5: pp. 21-35.
- [13] P. Kowalik, F. M. Slater, P. Randerson,. 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, 1996, chapter 16: pp. 189-200.
- [14] Z. Ye, A. J. Baker, M. N. Wong, A. J. Willis,. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. Ann Bot, 1997: pp. 363-370.
- [15] R. H. Kadlec,. Integrated natural systems for landfill leachate treatment, Wetlands – nutrients, metals and mass cycling, Vymazal J, (Ed,) Backhuys Publishers, Leiden 2003: pp. 1-33.

- [16] T. G. Bulc., Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering* 2006, 26: pp. 365-374.
- [17] A. E. Ghaly. and H. A. Farag, Phytoremediation of Anaerobic Digester Effluent for Water Purification and Production of Animal Feed. *American Journal of Agricultural and Biological Science* 2007, 2(1): 1-14.
- [18] Bhavsar S. i R. P. Vedavati, V. Diwan, Potential of Phytoremediation for dairy wastewater treatment. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*; ISSN: 2278-1684 PP: 16-23. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (SICETE).
- [19] E. Wojciechowska E., M. Gajewska, H. Obarska–Pempkowiak., Treatment of Lanfill Leachate by Constructed Wetlands: Three Case Studies, *Polish J. of Environ. Stud.*. 2010, 19 (3): pp. 643-650.
- [20] H. Brix, Denmark. In *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green and R. Haberl, (eds). 1998, Backhuys publ. Leiden, pp: 123-152.
- [21] H. Obarska-Pempkowiak., M. Gajewska, E. Wojciechowska, 2010a. *Hydrofitowe oczyszczalnie wód i ścieków*. Wyd. PWN, W-wa.
- [22] C. H. Sim,, M. K. Yusoff,, B. Shutes, S.C. Ho, M. Mansor,. Nutrient removal ina pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. *Journal of Environmental Management* 2008, 88 (2), 307-317.
- [23] S. Lee, M. C. Maniquiz, L. H. Kim, Characteristics of contaminants in water and sediment of a constructed wetland treating piggery wastewater effluent. *Journal of Environmental Sciences*, 2010 22 (6), 940-945.
- [24] I. Bruch, J. Fritsche, D. Bänninger, U. Alewella, M. Sendelov, H. Hürlimann,, R. Hasselbach, C. Alewell, Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource Technology* 2011, 102, 937-941.
- [25] T. Maehlum, Wetlands for treatment of landfill leachates in cold climates. In: Mulamoottil, G., McBean, E.A., Rovers, F.(Eds), *Proc. of the Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates*. CRC Lewis Publishers, NY, USA, 1998, pp. 33-46.
- [26] T. Ozimek, Wykorzystanie roślin do oczyszczania odcieków z wysypisk odpadów. *Wiadomości Ekologiczne*, 2009, Tom LV, Zeszyt 2: s 61-74.
- [27] G. Basílico, L. de Cabo, A.Faggi. Impacts of composite wastewater on a Pampean stream (Argentina) and phytoremediation alternative with *Spirodela intermedia* Koch (Lemnaceae) growing in batch reactors. *Journal of Environmental Management* 2013, 115: 53-59.
- [28] E. Lalke-Porczyk, M. Świętek-Brzezinska, W. Konderski, Rola oczyszczalni hydrobotanicznych w oczyszczaniu ścieków z terenów wiejskich. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*; 2010: t. 10 z. 3 (31), s. 119–127.
- [29] H. Obarska-Pempkowiak M. Gajewska, E. Wojciechowska., 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+Busines Media B.V. 2010b chapter 4: pp. 37-51.
- [30] W. Dąbrowski. Efektywność złóż hydrofitowych w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. *Society of Ecological Chemistry and Engineering*; 2011a, A. Opole; Vo1. 18, No 2, s.175-183.
- [31] W. Dąbrowski, Niskonakładowa i bezreagentowa metoda oczyszczania odcieków z przeróbki osadów w oczyszczalniach mleczarskich. *Politechnika Białostocka*, 2011b.
- [32] W. Dąbrowski, Określenie zmian stężenia zanieczyszczeń w profilu oczyszczalni ścieków mleczarskich na przykładzie S.M. Mlekovita w Wysokiem Mazowieckiem. *Inżynieria Ekologiczna* 2011c, Nr 24: s 236-242.

- [33] P. Bugajski, Hydrobotaniczne (hydrofitowe) oczyszczalnie ścieków. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Błękitny San”, Dubiecko 21-22. 04. 2006, s 93-99.
- [34] E. Wojciechowska, Doświadczenia z eksploatacji pilotowej hydrofitowej. Oczyszczalni odcieków ze składowiska odpadów komunalnych w zależności od reżimu hydraulicznego. Inżynieria Ekologiczna Nr 25, 2011, s 176-188.
- [35] M. Fountoulakis, S. Terzakis, A. Chatzinotas, H. Brix, N. Kalogerakis, T. Manios,. 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* 2009, 407, 2996-3003.
- [36] S. Xinshan, L. Qin, Y. Denghua, Nutrient removal by hybrid subsurface flow constructed wetlands for high concentration ammonia nitrogen wastewater. *Procedia Environmental Sciences* 2010, 2, 1461-1468.
- [37] Y. Chen, Y. Wen, J. Cheng, C. Xue, D. Yang, Q. Zhou, Effects of dissolved oxygen on extracellular enzymes activities and transformation of carbon sources from plant biomass: implications for denitrification in constructed wetlands. *Bioresource Technology* 201, 1102, 2433-2440.
- [38] Z. Filipkowska, Sanitary and bacteriological aspects of sewage treatment. *Acta Microbiol. Polon.* 2003, 52 s. 57–66.
- [39] S. Jezierska-Tys, M. Frąć, Badania nad wpływem osadu z oczyszczalni ścieków mleczarskich na aktywność mikrobiologiczną i biochemiczną gleby. *Acta Agrophysica* 2008, .160 No 3: s 1-109.
- [40] E. J. Dunn, N. Culleton, G. O'Donovan, R. Harrington and A. E. Olsen, An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water, *Ecological Engineering*, 2005, .24(3): 219-232,
- [41] N. Gottschall, C. Boutin and A. Crolla., C. Kinsley and P. Champagne, The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada *Ecological Engineering*, 2007, 29 (2): 154-163,
- [42] Y. Arda and U. Aysenur, Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment, *Bioresource Technology*, 2009.100(9): 2521-2526,
- [43] S. G. Buchberger and G. B. Shaw, An approach toward rational design of constructed wetlands for wastewater treatment, *Ecological Engineering*, 1995, .4 (4) : 249-275,
- [44] S. A. Dipu, V. A. Kumar and S. Gnana Thanga. Phytoremediation of Dairy Effluent by Constructed Wetland Technology Using Wetland Macrophytes. *Global Journal of Environmental Research* 2010, 4 (2): 90-100, 2010
- [45] J. S. Sudarsan, T. Deeptha, D. Ashutosh, Phytoremediation of dairy-waste water using constructed Wetland *Int J Pharm Bio Sci* 2012 July; 3(3): (B) 745 – 755.
- [46] O. F. Abioye, Phytoremediation of arsenic-contaminated soil and groundwater, PhD Thesis. University of Florida, 2005, pp: 122-138.
- [47] Q. Mahmood, P. Zheng, E. Islam, Y. Hayat, M.J. Hassan, G. Jilani and R.C. Jin, Lab Scale Studies on Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* Marts Solms) for Bio treatment of Textile Wastewater. *Caspian J. Environmental Sci.*, 2005, 3: 83-88.
- [48] S. Neralla, R.W. Weaver, T.W. Varvel and B.J. Lesikar, Phytoremediation and on-site treatment of septic effluents in sub-surface flow constructed wetlands. *Environmental Technol.*, 2007, 20: 1139-1146.
- [49] V. R. Gudekar, and R.K. Trivedi,. Effect of surface area covered by water hyacinth. *Indian J. Environmental Protection*, 1989, 19: 103-107.

- [50] J. Vymazal, The use of sub-surface constructed wetlands for waste water treatment in the Czech Republic: 10 years experience: *Ecological Engineering*, 2002, 18: 633-646.
- [51] C. Simon and M. Silhol, Purification of pisciculture waste through cultivation and harvesting of aquatic biomass. *Water Sci. and Technol.*, 1987, 19: 113-121.
- [52] B. M. Tegege, J.J.A. Hans Van Bruggen, J. O'Keeffe and S.W. Wasala,. A Constructed Wetland for Wastewater Treatment Emphasis on Optimization of Nitrogen Removal. UNESCO-IHE Institute for water education. *Watermill Working Paper Series*, 2008, pp: 24-27.
- [53] A. E. Ghaly and H. A. Farag 2007. Phytoremediation of Anaerobic Digester Effluent for Water Purification and Production of Animal Feed. *American Journal of Agricultural and Biological Science* 2007, .2(1): 1-14.
- [54] M. C. Hartman and W. Eldowney, *Pollution: Ecology and biotechnology*. John Wiley and sons Inc. New York 1993., pp: 174-189.
- [55] K. R. Reddy and T.A. Debusk,. Utilization of aquatic plants in water pollution control. *Water Sci. and Technol.*, 1987, 19: 61-79.
- [56] A. Dixon, M. Simon and T. Burkitt, Assessing the environmental impact of two options for small scale wastewater treatment: Comparing a reed bed and an aerated biological filter using a life cycle approach. *Ecological Engineering*, 2003, 20: 297-308.
- [57] H. Azaizeh, N. Salhani, Z. Sebesvari and H. Emons, The potential of rhizosphere microbes isolated from a constructed wetland to biomethylate selenium. *J. Environmental Quality*, 2003, 32: 55-62.
- [58] M. Mańczak, M. Balbierz., M. Szetela. *Ochrona Środowiska* 1987, 521/1 (31): s 29-31.
- [59] Z. Sadecka, Ocena efektywności pracy wybranych oczyszczalni hydrobotanicznych. *Ochrona Środowiska*: 2003, 25, (1): 13-16.
- [60] Z. Sadecka, Weryfikacja danych do modernizacji oczyszczalni ścieków. *Forum Eksploatatora* 2011, 3: 58-62.
- [61] W. Dąbrowski, Skuteczność oczyszczania ścieków mleczarskich w systemach hydrofitowych. II Ogólnopolska Konferencja Naukowa: Mokrada i Ekosystemy słodkowodne – funkcjonowanie, zagrożenie i ochrona, Augustów 2009; s. 29-30.
- [62] W. Dąbrowski, Zgłoszenie patentowe: „Określenie przydatności złóż hydrofitowych do oczyszczania odcieków z tlenowej przeróbki osadów w oczyszczalniach ścieków mleczarskich”, Politechnika Białostocka 2009.
- [63] P.U.H. Eko-Eksploatacja: 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.
- [64] (<http://www.rpm.com.pl/rpm/index.php?kolektory-sanitarne-i-oczyszczalnie-sciekow,38>)

Abstract

The dairy industry in Poland produces about 92,000 m³ of dairy sewage a day. For treatment of this type of contamination conventional treatment systems, such as membrane bioreactors, are used. Natural wetland technology associated with phytoremediation strategy is the most effective method in the treatment of wastewater. It is a biological process in which heterotrophic microorganisms and plants are involved. CWs are capable of removing organic matter, nitrogen, phosphorus and other pollutants including heavy metals. Wetland method may provide an alternative to costly advanced dairy sewage treatment technologies.

Key words: waste dairy, constructed wetlands, phytoremediation, aquatic plants, heavy metals