

# Wykorzystanie metody hydrofitowej do unieszkodliwiania ścieków i osadów ściekowych z zakładów mleczarskich – przegląd

Krzysztof Józwiakowski<sup>1</sup>, Karolina Józwiakowska<sup>2</sup>, Tadeusz Siwiec<sup>1</sup>, Piotr Bugajski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Katedra Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

<sup>2</sup> Katedra Maszyn Rolniczych, Leśnych i Transportowych, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

<sup>3</sup> Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

e-mail: krzysztof.jozwiakowski@up.lublin.pl

## Wstęp

Stosowanie systemów hydrofitowych w celu ochrony zasobów wodnych w Polsce i na świecie ma wieloletnią tradycję. W systemach hydrofitowych wykorzystuje się właściwości materiału filtracyjnego i roślin do rozkładu oraz eliminacji zanieczyszczeń organicznych i biogennych z wód i ścieków oraz z osadów ściekowych. W krajach o ciepłym klimacie stosowane są systemy wodno-roślinne i gruntowo-roślinne. Natomiast w krajach, gdzie występują ujemne temperatury powietrza w okresie zimowym stosuje się głównie systemy gruntowo-roślinne z pionowym (VF) lub poziomym (HF) przepływem ścieków [17, 18]. Początkowo na świecie stosowano jednostopniowe systemy hydrofitowe składające się z jednego złoża gruntowo-roślinnego. Natomiast w XXI wieku coraz częściej stosuje się systemy hybrydowe, składające się z kilku złożów gruntowo-roślinnych, które zapewniają lepsze efekty usuwania zanieczyszczeń ze ścieków [8]. Systemy hydrofitowe wpisują się w ideę zrównoważonego rozwoju [9], a w ostatnich latach zostały uznane jako zielone technologie [14] i rozwiązania oparte na zasobach przyrody [5]. Celem pracy jest prezentacja wybranych doświadczeń w zakresie zastosowania systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków i odwadniania osadów ściekowych powstających w zakładach mleczarskich.

## Zastosowanie systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków bytowych

Systemy hydrofitowe w Polsce dotychczas stosowano głównie do oczyszczania ścieków bytowych w oczyszczalniach zbiorczych i przydomowych. 25-letnie badania systemów hydrofitowych prowadzone przez Józwiakowskiego i in. [2019] wykazały, że jednostopniowe systemy hydrofitowe typu VF i HF zapewniały około 80% skuteczność usuwania zawiesiny ogólnej oraz redukcję BZT5 i ChZT na poziomie od 84 do 89%. Systemy te były mniej skuteczne w usuwaniu związków biogennych: azotu i fosforu (59–66%). Znacznie wyższe efekty usuwania podstawowych wskaźników zanieczyszczeń (powyżej 92%) uzyskano dla hybrydowych oczyszczalni hydrofitowych o konfiguracji złożów VF-HF. Ponadto systemy te eliminowały ok. 65% azotu ogólnego i 89% fosforu ogólnego ze ścieków. Analiza statystyczna wykazała, że układy hybrydowe VF-HF i HF-VF charakteryzowały się bardzo wysoką (99%) niezawodnością w usuwaniu zanieczyszczeń w tych układach. W okresie badań ścieki odprowadzane z tych systemów spełniały wymagania prawne pod względem dopuszczalnej wartości zawiesiny ogólnej, BZT5 i ChZT przez ponad 361 dni w roku. 25-letnie badania i doświadczenia w zakresie budowy i eksploatacji hydrofitowych oczyszczalni ścieków w południowo-wschodniej Polsce wykazały, że systemy jednostopniowe można stosować na większą skalę na terenach wiejskich o rozproszonej zabudowie mieszkaniowej, gdzie nie ma wymagań dotyczących usuwania związków biogennych. Natomiast systemy hybrydowe



można z powodzeniem stosować w ośrodkach rekreacyjnych lub na obszarach chronionych, typu parki narodowe, gdzie ze względów estetycznych i krajobrazowych budowa konwencjonalnych oczyszczalni ścieków opartych na procesie osadu czynnego zazwyczaj nie jest wskazana [10, 11].

### Zastosowanie systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków z zakładów mleczarskich

W praktyce znane są również prace prezentujące możliwość zastosowania systemów hydrofitowych do oczyszczania wód powierzchniowych, odwadniania osadów ściekowych, czy oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów [17, 18]. Systemy te znalazły również zastosowanie do oczyszczania ścieków przemysłowych, w tym m.in. do oczyszczania ścieków pochodzących z zakładów mleczarskich [1, 4, 6, 15, 19].

Ścieki odpływające z zakładów mleczarskich powstają w wyniku procesów pasteryzacji i homogenizacji płynnego mleka. Duże ilości ścieków powstają również podczas produkcji produktów mleczarskich, takich jak: masło, ser, mleko w proszku itp. Ponadto duże ilości wody są używane do czyszczenia urządzeń przetwórczych, co skutkuje powstawaniem ścieków zawierających detergenty, środki dezynfekujące, zasady, sole i materię organiczną [2]. Ponieważ przemysł mleczarski generuje duże ilości ścieków – z litra przetworzonego mleka powstaje od 0,2 do 10 l ścieków [16]. Ścieki mleczarskie zawierają wysokie stężenia materii organicznej (np. tłuszczu, mleka, białka, laktozy, kwasu mlekowego), minerałów i detergentów. Typowe ścieki mleczarskie cechuje ChZT na poziomie 4000–59 000 mg/l zawiesiny, ogólne w zakresie 70–800 mg/l, azot ogólny na poziomie 100–1400 mg/l i fosfor ogólny w zakresie 25–450 mg/l TP [16].

Doświadczenia z Belgii, Holandii i Grecji dotyczące zastosowania systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków mleczarskich zaprezentowali Akratos i in. [2018]. Autorzy Ci wskazali, że oczyszczanie ścieków mleczarskich jest samo w sobie dużym wyzwaniem ze względu na wysokie ładunki zanieczyszczeń, jakie one zawierają. Badania przeprowadzone w Belgii i Holandii wykazały, że systemy hydrofitowe wypełnione piaskiem okazały się wysoce efektywnymi systemami do oczyszczania ścieków, wymagającymi bardzo niewielkiej konserwacji i stosunkowo niewielkiej powierzchni. Przy projektowaniu tych systemów zalecono, aby obciążenie powierzchni złoża ładunkiem zanieczyszczeń nie przekraczało wartości  $20 \text{ g BZT} \times \text{m} \times 2 \times \text{d}^{-1}$ . Przy takim współczynniku obciążenia systemy hydrofitowe wykazywały efekty redukcji BZT, ChZT i azotu organicznego na poziomie powyżej 90% i były niezmiennie przez okres 17 lat. W systemach tych uzyskano również zadowalające efekty usuwania azotu ogólnego – na poziomie 40–60%. Stwierdzono, że dodanie stawu lub systemu z powierzchniowym przepływem ścieków może zwiększyć efekty usuwania azotu ogólnego. Zaobserwowano, że przy dodawaniu jonów żelaza do złoża filtracyjnego usuwanie fosforu ogólnego początkowo jest wysokie, ale zmniejsza się z czasem z w wyniku zmniejszania się zdolności sorpcyjnej złoża w zakresie pochłaniania związków fosforu. Wykazano również, że napowietrzane systemy hydrofitowe wydają się być obiecującą, ekonomiczną alternatywą. Jednak dostępne dane na temat oczyszczania ścieków mleczarskich za pomocą złożów gruntowo-roślinnych wspomaganych napowietrzaniem są mało rozpoznane [1].

Badania przeprowadzone przez Tatoulis i in. [2017] w Grecji wskazały, że systemy hydrofitowe z dużym powodzeniem mogą być stosowane do oczyszczania ścieków przemysłowych i przemysłowo-rolniczych. Głównymi ograniczeniami szerokiego zastosowania tej technologii są: stosunkowo wysokie wymagania dotyczące powierzchni w porównaniu z technologiami tradycyjnymi i powszechne występowanie zjawiska zatykania złożów gruntowo-roślinnych. Badania prowadzone przez 2 lata w skali pilotażowej wykazały, że zastosowanie plastikowych mediów HDPE do wypełnienia złoża gruntowo-roślinnego z trzcina pospolitą może zmniejszyć wymagania dotyczące powierzchni o 75% oraz ograniczyć zjawisko kolmatacji złoża. W ten sposób w systemie hydrofitowym można zastosować trzykrotnie wyższe obciążenie hydrauliczne i czterokrotnie wyższe obciążenie substancją organiczną, w porównaniu z tradycyjnym systemem ze złożem żwirowym. Stwierdzono również, że temperatura powietrza i hydrauliczny czas retencji (2 i 4 dni) nie miały znaczącego wpływu na efekty usuwania zanieczyszczeń [15].



Również w pracy Healy i in. [2007] omówiono kryteria projektowania i wykonania sztucznych systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków mleczarskich [6]. Natomiast Dunne i in. [2005] w Irlandii badali jakość i ilość zanieczyszczanej wody wytwarzanej w oborze krów mlecznych, czy wody pochodzącej z mycia hali udojowej oraz ścieków z kiszonki/obornika. Autorzy Ci badali również sezonową skuteczność sztucznego systemu hydrofitowego o powierzchni 4800 m<sup>2</sup> w zakresie oczyszczania ścieków z obory z hodowli 42 krów mlecznych. Dopływ ścieków do oczyszczalni hydrofitowej w okresie badań wahał się od 3,6 – 18,5 m<sup>3</sup>×d<sup>-1</sup>. Wykazano, że ilość i jakość ścieków z obory nie zmieniały się istotnie w różnych porach roku. Stwierdzono, że badany system hydrofitowy usuwał od 5-84% fosforu, przy czym najmniejsze jego ilości były zatrzymywane zimą [4]. Z kolei Zhang i in [2017] analizowali funkcjonowanie w pełnej skali technicznej 3 hybrydowych hydrofitowych oczyszczalni ścieków, z podpowierzchniowym przepływem, zbudowanych w północnej Japonii na wyspie Hokkaido. Dwa obiekty służyły do oczyszczania ścieków odprowadzanych z mleczarni, a jeden obiekt stosowano do oczyszczania ścieków z chlewni. Wykazano, że skuteczność redukcji azotu ogólnego, azotu amonowego, fosforu ogólnego, ChZT, BZT, zawiesiny ogólnej i bakterii grupy coli w tych systemach wynosiła odpowiednio: 70–86%, 40–85%, 71–90%, 91–96%, 94–98%, 84–97% i 70–97%. Autorzy tych badań stwierdzili, że hybrydowe systemy hydrofitowe cechuje stała i wysoka skuteczność usuwania zanieczyszczeń, którą osiągnęto nawet w ekstremalnie zimnych warunkach klimatycznych i wiele lat od początku budowy oczyszczalni [19].

#### Zastosowanie systemów hydrofitowych do odwadniania osadów ściekowych

Dotychczas niewiele jest prac naukowych na temat odwadniania osadów ściekowych powstających w zakładach mleczarskich przy zastosowaniu systemów hydrofitowych, gdyż technologia ta najczęściej jest stosowana do odwadniania osadów powstających podczas oczyszczania ścieków bytowych [12]. Według Nielsena i Stefanakisa [2020] niektóre rodzaje osadów ściekowych nie odwadniają się tak łatwo, zwłaszcza osady z oczyszczalni ścieków mleczarskich lub rzeźniczych o wysokiej zawartości tłuszczu i oleju. Dlatego tego typu osady mogą być trudne do odwadniania w systemach hydrofitowych [13].

Z dostępnej literatury wynika, że systemy hydrofitowe stosowano do oczyszczania odcieków powstających w procesie tlenowej stabilizacji osadów ściekowych w największej w Polsce oczyszczalni ścieków mleczarskich w Polsce [3]. Autorzy tej pracy badali 2 złoża z pionowym przepływem o głębokości 0,65 m (A) i 1,0 m (B) obsadzone trzciną pospolitą, przy obciążeniu hydraulicznym odciekami na poziomie 0,1 m×d<sup>-1</sup>. Wykazano, że systemy te podczas 8 miesięcy eksploatacji redukowały zanieczyszczenia na następującym poziomie: BZT5: 88,1% (A) i 90,5% (B); ChZT: 84,5% (A) i 87,5% (B); zawiesina ogólna: 87,6% (A) i 91,9% (B); azot ogólny: 82,4% (A) i 76,5% (B); azot amonowy: 89,2% (A) i 85,7% (B); fosfor ogólny: 30,2% (A) i 40,6% (B). Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w efektywności usuwania pomiędzy złożem A i B. Badania wykazały, że złoża z pionowym przepływem można z powodzeniem stosować do oczyszczania odcieków powstających w procesie tlenowej stabilizacji osadów ściekowych.

Z przeglądu literatury podanego powyżej wynika, że niezbędne są badania dotyczące możliwości zastosowania systemów hydrofitowych do odwadniania osadów ściekowych powstających w zakładach mleczarskich. Dlatego tego typu prace badawcze planuje się przeprowadzić w ramach projektu SUP-RIM.

#### Podsumowanie

Jak wynika z zaprezentowanych ww. doniesień literaturowych hydrofitowa metoda oczyszczania ścieków i odwadniania osadów może być skutecznym i tanim sposobem na rozwiązanie problemów z zakresu gospodarki wodnej i ściekowej w zakładach mleczarskich. Niezbędne są jednak dalsze badania systemów hydrofitowych, które będą miały na celu ocenę możliwości ich zastosowania do doczyszczania ścieków i odwadniania osadów z mleczarni w warunkach Polski. Niezbędne są badania mające na celu określenie: 1) najskuteczniejszych materiałów filtracyjnych i ich optymalnej warstwy, 2) doboru odpowiedniej roślinności w systemach hydrofitowych do oczyszczania ścieków i odwadniania osadów ściekowych, 3) powierzchni złóż gruntowo-





roślinnych w zależności od obciążenia hydraulicznego i ładunkiem zanieczyszczeń, 4) możliwości zastosowania systemów hydrofitowych do oczyszczania ścieków i odwadniania osadów ściekowych z zakładów mleczarskich po procesach mechanicznego oczyszczania. Bardzo ważne będą również badania, które zaplanowano w ramach realizacji projektu SUP-RIM, a dotyczące zastosowania systemów hydrofitowych do odwadniania osadów ściekowych i doczyszczania ścieków z zakładów mleczarskich po biologicznym oczyszczeniu, co pozwoli na ich powtórne wykorzystanie np. w rolnictwie, czy do spłukiwania toalet przykładowych. Wyniki tych badań mogą przyczynić się do wprowadzania do zakładów mleczarskich ekologicznych rozwiązań opartych na zasobach przyrody i do tworzenia zamkniętych obiegów wody.

### Bibliografia:

1. Akrotas, C.S., Van Oirschot, D., Tekerlekopoulou, A.G., Vayenas, D.V. and Stefanakis, A.I., (2018). Dairy Wastewater Treatment with Constructed Wetlands: Experiences from Belgium, the Netherlands and Greece. In Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment, S. Alexandros (Ed.).
2. Belyea R.L., Williams J.E., Gieseka L., Clevenger T.E., Brown J.R. (1990). Evaluation of dairy waste water solids as a feed Ingredient. J Dairy Sci. 73,1864–1871.
3. Dąbrowski W., Karolinczak B., Gajewska M., Wojciechowska E. (2017). Application of subsurface vertical flow constructed wetlands to reject water treatment in dairy wastewater treatment plant. Environmental Technology 38 (2), 175-182.
4. Dunne, E.J., Culleton, N., Donovan, G.O., Harrington, R., Olsen, A.E., (2005). An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water. Ecol. Eng. 24, 221-234.
5. Gonzalez-Flo E., Romero X., García J. (2023). Nature based-solutions for water reuse: 20 years of performance evaluation of a full-scale constructed wetland system. Ecological Engineering 188, 106876.
6. Healy, M.G., Rodgers, M., Mulqueen, J., (2007). Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters. Bioresour. Technol. 98, 2268-2281.
7. Józwiakowski K. (2012). Badania skuteczności oczyszczania ścieków w wybranych systemach gruntowo-roślinnych. Monografia. Rozprawa habilitacyjna. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. PAN Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi, 1/2012, 232.
8. Józwiakowski, K., Mucha, Z., Generowicz, A., Baran, S., Bielińska, J., Wójcik, W., (2014). The use of multi-criteria analysis for selection of technology for a household WWTP compatible with sustainable development. Arch. Environ. Prot. 3, 76–82.
9. Józwiakowski K., Marzec M., Kowalczyk-Juśko A., Gizińska-Górna, M., Pytka-Woszczyno A., Malik A., Listosz A., Gajewska M., (2019). 25 years of research and experiences about the application of constructed wetlands in southeastern Poland. Ecological Engineering, 127, 440–453.
10. Micek A., Józwiakowski K., Marzec M., Listosz A. (2020). Technological reliability and efficiency of wastewater treatment in two hybrid constructed wetlands in the Roztocze National Park (Poland). Water 12, 3435.
11. Myka-Raduj A., Bohacz J., Listosz A., Raduj W., Józwiakowski K. (2024). Efficiency of operation a hybrid constructed wetland located in the Polesie National Park (Poland) during the start-up period. Journal of Ecological Engineering 2024, 25(6): 292–311.
12. Nielsen S. (2003). Sludge drying reed beds. Water Sci. Technol. 48, 101–108.
13. Nielsen S., Stefanakis A. I. (2020). Sustainable Dewatering of Industrial Sludges in Sludge Treatment Reed Beds: Experiences from Pilot and Full-Scale Studies under Different Climates. Appl. Sci. 10, 7446.



14. Stefanakis A.I. (2019). The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability* 11, 6981.
15. Tatoulis, T. Akratos, Ch. ,Tekerlekopoulou, A., Vayenas, D., Stefanakis, A. (2017). A novel horizontal subsurface flow constructed wetland: Reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere* 186, 257-268.
16. Vourch M., Balannec B., Chaufer B., Dorange G. (2008). Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination* 219,190–202.
17. Vymazal J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water* 2 (3), 530-549.
18. Vymazal J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environ. Sci. Technol.* 45, 61–69.
19. Zhang X., Inoue T., Kato K., Izumoto H., Harada J., Sakuragi H., Ietsugu H., Sugawara Y., (2017). Multi-stage hybrid subsurface flow constructed wetlands for treating piggery and dairy wastewater in cold climate. *Environ. Technol.* 38 (2), 183-191.