

# Pływające wyspy hydrofitowe jako rozwiązanie problemów eutrofizacji wód – koncepcja metody, zastosowanie i wybrane zagadnienia projektowe

Floating treatment islands as a solution to surface water eutrophication problems – method idea, application, and specific design concerns

NICOLE NAWROT, NATALIA JANOWICZ, EWA WOJCIECHOWSKA

DOI 10.36119/15.2023.3.8

Pływające wyspy hydrofitowe są coraz częściej spotykanym elementem krajobrazu – szczególnie na otwartych akwenach miejskich. Posiadają walory estetyczne, są rozwiązaniami opartymi na naturze, poprawiają mikroklimat, a przede wszystkim pełnią funkcję oczyszczającą. Do tej pory jednak nie udało się precyzyjnie sklasyfikować rozwiązań pływających wysp hydrofitowych (z ang. *floating treatment islands*) w nomenklaturze polskiej. Brakuje również specyficznych wytycznych do ich projektowania. W niniejszym artykule podjęto się wyjaśnienia idei metody, klasyfikacji systemu pływających wysp hydrofitowych, omówiono podstawowe mechanizmy usuwania zanieczyszczeń oraz wybrane zagadnienia projektowe. Praca powstała w wyniku realizacji projektu Preludium 18 [2019/35/N/ST8/01134].

*Słowa kluczowe:* pływające wyspy hydrofitowe; biogeny; eutrofizacja; utrzymanie wód powierzchniowych; inżynieria ekologiczna

The popularity and presence of floating treatment islands in the landscape is increasing rapidly, particularly on open urban reservoirs. They are distinguished by their aesthetic value, belong to nature-based solutions, improve the microclimate, and, most importantly, have a cleansing function. However, in the Polish nomenclature, floating treatment islands solutions have yet to be precisely classified. There are also no specific design guidelines. This article attempts to explain the method's concept, classify the system of Floating Treatment Wetlands, discuss the basic pollutant removal mechanisms, and discuss selected design issues. The work was created as a result of the Preludium 18 project [2019/35/N/ST8/01134].

*Keywords:* floating treatment islands; nutrients; eutrophication; surface water protection; ecological engineering

## Idea metody

W obliczu nasilającego się kryzysu klimatycznego zarządzanie zasobami wodnymi nabiera kluczowego znaczenia. Ze względu na ograniczone zasoby wodne Polski zrównoważone gospodarowanie wodą jest szczególnie ważne. W odniesieniu do wód stojących i płynących, które są narażone na dopływ zanieczyszczeń w formie niekontrolowanego spływu powierzchniowego czy punktowych zrzutów ścieków, fundamentalną rolę odgrywa ich odpowiednie utrzymanie (jakościowe i ilościowe). Wobec wyczerpywania się zasobów naturalnych, zrównoważone podejście do gospodarki wodnej polega na zastosowaniu nowoczesnych metod oczyszczania ścieków i ponownego wykorzystania wody. W tym kontekście bardzo

przydatne są technologie naturalne, które nie wymagają nadmiernych nakładów inwestycyjnych ani użycia dodatkowych chemikaliów. Przykładem są oczyszczalnie hydrofitowe (z ang. *constructed wetlands*), a ich relatywnie nową odmianą, dedykowaną do stosowania na wodach otwartych, są pływające wyspy hydrofitowe (z ang. *floating treatment islands*).

Pływające wyspy hydrofitowe można zdefiniować jako systemy inżynierskie zaprojektowane do usuwania z wody niepożądanych substancji (np. biogennych), które wykorzystują i maksymalizują procesy zachodzące w środowisku naturalnym (White, 2021). Technologia wykazuje niskie nakłady inwestycyjne oraz niewielkie wymagania eksploatacyjne i konserwacyjne. Co ważne, metoda jest całkowicie niezależna od własności gruntów,

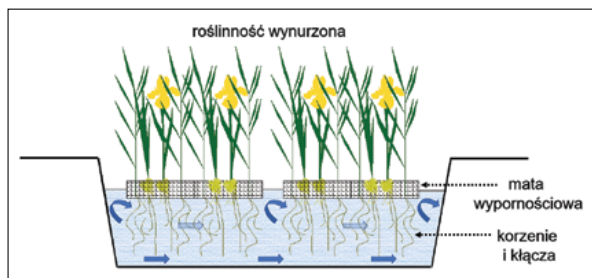
ponieważ instalacja wysp odbywa się bezpośrednio na wodzie (tzw. oczyszczanie in-situ). W skład systemu wchodzi unoszące się na powierzchni wody maty obsadzone wynurzonymi roślinami naczyniowymi, których korzenie i kłącza w całości zanurzone są w toni wodnej sięgając stref pelagicznych, tworząc swoisty filtr zanieczyszczeń (rys. 1).

System oczyszczania ma cechy zarówno stawu oczyszczającego jak również oczyszczalni hydrofitowej, w którym pomiędzy siecią korzeni i kłączy, a dnem zbiornika ustala się gradient hydrauliczny, a zanieczyszczenia są filtrowane i/lub degradowane w wyniku synergicznego działania korzeni i związanych z nimi zbiorowisk mikroorganizmów. Ze względu na powinowactwo technologii pływających wysp hydrofitowych do stawów oczyszczających

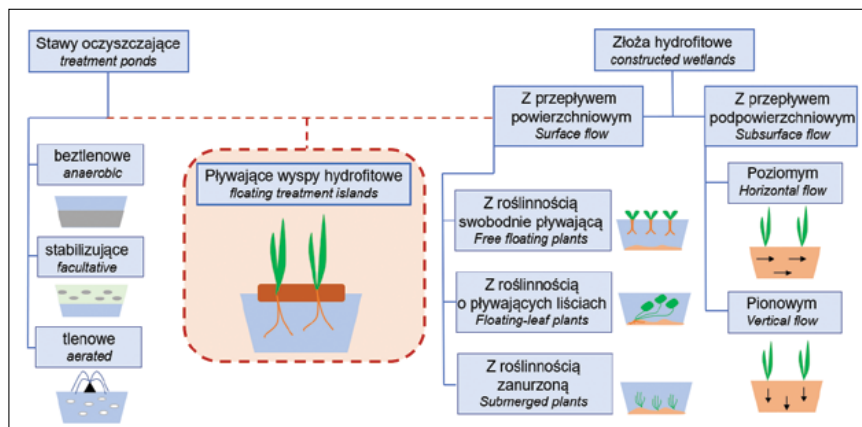
dr inż. Nicole Nawrot, adiunkt, nicole.nawrot@pg.edu.pl – autor korespondencyjny <https://orcid.org/0000-0001-5737-5143>

mgr inż. Natalia Janowicz, asystent, natalia.janowicz@pg.edu.pl

prof. dr hab. inż. Ewa Wojciechowska, profesor, ewa.wojciechowska@pg.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-9164-528X> – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk



**Rysunek 1**  
Budowa i idea systemu pływających wysp hydrofitowych ze wskazaniem kierunków przepływu i mieszania wody (opracowanie własne)  
*Figure 1 Construction and idea of a system of floating treatment islands with indication of water flow and mixing directions (own elaboration)*



**Rysunek 2**  
Klasyfikacja pływających wysp hydrofitowych jako technologii pośredniej pomiędzy stawami oczyszczającymi, a złóżami hydrofitowymi (opracowano na podstawie Colares i in., 2018)  
*Figure 2 Classification of floating treatment islands as an intermediate technology between treatment ponds and constructed wetlands (based on Colares et al., 2018)*

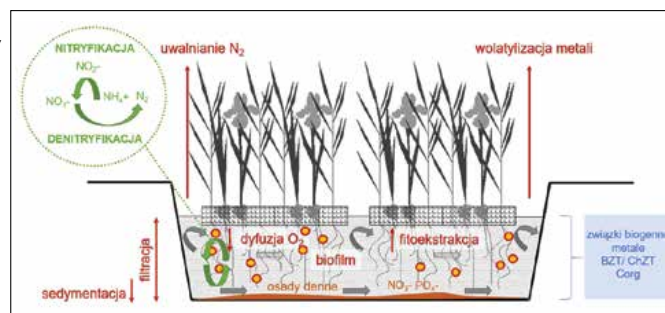
i złóż hydrofitowych ich klasyfikacja prezentuje się następująco (rys. 2):

### Mechanizmy usuwania zanieczyszczeń z zastosowaniem pływających wysp hydrofitowych

Dzięki wykorzystaniu systemów wysp hydrofitowych możliwe jest usuwanie zanieczyszczeń zarówno organicznych jak i nieorganicznych (zawiesin, substancji biogennych, metali ciężkich).

W celu osiągnięcia jak najlepszych efektów oczyszczania kluczowy jest intensywny rozwój korzeni i kłączy oraz rozwój biofilmu i mikroorganizmów na ich powierzchni. Rozwój mikrobiomu jest dodatkowo wspomagany przez transfer tlenu za pośrednictwem aerenchymy (tkanki powietrznej) z nadwodnych do podwodnych części roślin oraz tzw. wysięki korzeniowe. Podstawowe mechanizmy obiegu składników odżywczych i zanieczyszczeń w technologii pływających wysp hydrofitowych zostały przedstawione na rys. 3. W strefie korzeniowej dochodzi do zintensyfikowania procesów filtracji i asymilacji zanieczyszczeń. Składniki odżywcze są pobierane przez rośliny na drodze biosyntezy/wiązania w tkankach roślinnych, a także usuwane w wyniku procesów mikrobiologicznych (nityfikacja, denityfikacja). Część zanieczyszczeń związana z zawiesziną łatwo opadającą sedymentuje do

**Rysunek 3**  
Procesy i mechanizmy zachodzące w zbiorniku otwartym z technologią pływających wysp hydrofitowych  
*Figure 3 Processes and mechanisms taking place in an open reservoir with the technology of floating treatment islands*



osadów dennych natomiast związki lotne mogą zostać utlenione i uwolnione do atmosfery.

### Biogeny

Usuwanie składników odżywczych w systemie pływających wysp hydrofitowych jest determinowane przez szereg procesów biogeochemicznych. W warunkach hydroponicznych pobieranie składników odżywczych jest bardziej efektywne w porównaniu do upraw w gruncie. Poprzez rozwinięty system korzeniowy rośliny aktywnie pobierają biogeny z toni wodnej. Ten proces zwany biosyntezą dotyczy głównie azotu (Barco i in., 2021). Podstawowymi formami azotu, które są pobierane przez rośliny wyższe i mikroalgi powszechnie występujące w stawach wodnych są jony amonowe ( $\text{NH}_4^+$ ) i azotanowe (V) ( $\text{NO}_3^-$ ). Skuteczność usuwania azotu zależy od rodzaju zastosowanych gatunków roślin, ich budowy anatomicznej, właściwości fizjolo-

gicznych, charakterystyki wzrostu, rodzaju korzenia, wieku, klimatu, rodzaju ścieków/zanieczyszczeń i innych warunków środowiskowych. Średnia efektywność wchłaniania azotu przez rośliny zmienia się w szerokich granicach od 4 do 90% (Tanner i in., 2002). W związku z tym, że pobieranie azotu przez rośliny następuje do osiągnięcia poziomu nasycenia, dalsze usuwanie tego pierwiastka jest wspomagane w systemie pływających wysp hydrofitowych przez mikroorganizmy uczestniczące w biologicznych procesach nityfikacji i denityfikacji, których końcowym produktem jest azot w formie gazowej.

Fosfor jest usuwany na drodze sorpcji, kompleksacji, wytrącania i asymilacji biomasy mikroorganizmów i roślin. Podobnie jak w przypadku azotu, usuwanie fosforu w systemach pływających wysp hydrofitowych jest zależne od współczynnika wzrostu roślin oraz zdolności jego pochłaniania przez tkanki (Shahid i in., 2018).

### Materia organiczna (BZT/ ChZT) i zawiesina ogólna

Usuwanie materii organicznej w systemach pływających wysp hydrofitowych

jest przede wszystkim wynikiem biodegradacji z udziałem mikroorganizmów przyczepionych do podwodnych części roślin oraz materiałów tworzących wyspy. Dodatkowo biodegradacja jest wspomagana przez procesy, takie jak: filtracja, asymilacja i natlenianie. Na możliwość degradacji materii organicznej istotny wpływ ma stosunek biochemicznego zapotrzebowania na tlen (BZT) do chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT) – przyjmuje się, że ścieki o stosunku BZT/ChZT  $>0,5$  zawierają wyższy ładunek materii organicznej i tym samym łatwiej ulegają biodegradacji (Dojlido, 1999).

Zawiesina ogólna jest usuwana w wyniku procesów sedymentacji i filtracji. W związku z ograniczeniem turbulencji przepływu i wyciszeniem falowania przez system pływających wysp hydrofitowych, powstają korzystne warunki do osadzania zanieczyszczeń i deponowania ich do osadów dennych (Shahid i in., 2018).

## Metale ciężkie

W usuwaniu metali śladowych kluczową rolę odgrywają procesy adsorpcji, bezpośredniego pobierania przez rośliny, bakterie i glony oraz procesy mikrobiologiczne. Metale mogą deponować do osadów dennych wraz z drobnymi cząstkami zawieszonymi. Wytrącanie metali w formie siarczków czy wodorotlenków jest stymulowane przez wysięki korzeniowe. Metale ciężkie mogą być także aktywnie lub pasywnie pobierane przez rośliny i wiązane w korzeniach i kłęczach (fitostabilizacja) lub translokowane do nadziemnych części rośliny (fitoekstrakcja). Wykazano, że obecność szczątków roślin oraz związków organicznych sprzyja sorpcji metali (Karathanasis i in., 2003). Stwierdzono również, że bakterie ryzo – i endofityczne wykazują zdolność do sorpcji jonów metali na ścianach komórkowych oraz zwiększają biodostępność metali, co odgrywa kluczową rolę w ich usuwaniu.

## Wydajność usuwania zanieczyszczeń

Skuteczność usuwania zanieczyszczeń w technologii pływających wysp hydrofitowych została wielokrotnie udowodniona w badaniach eksperymentalnych, pilotowych i pełnej skali. Na podstawie dostępnych danych literaturowych można wnioskować o przydatności technologii, jednakże wciąż nierozwiązane i wymagające dalszych analiz oraz usystematyzowania są parametry projektowe tego typu systemów.

Średnia wydajność systemu pływających wysp hydrofitowych, a także efektywności graniczne zostały przedstawione w tabeli 1:

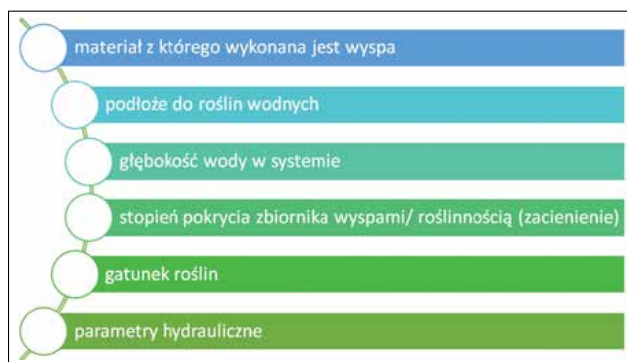
**Tabela 1** Wydajność usuwania wybranych zanieczyszczeń w systemie pływających wysp hydrofitowych (opracowano na podstawie Colares i in., 2020, Pavlineri i in., 2017 i Shahid i in., 2018)  
**Table 1** Removal efficiency of selected pollutants in a system of floating treatment islands (based on Colares et al., 2020, Pavlineri et al., 2017 and Shahid et al., 2018)

Wartość	Wydajność usuwania wybranych zanieczyszczeń [%]				
	Azot ogólny	Azot amonowy	Fosfor ogólny	Materia organiczna	Zawiesina ogólna
średnia	58	73	50	ChZT: 58	brak danych
min-max	7.8-98	25-100	8-98	ChZT: 17-84 BZT: 36-90	2.7-45 * *g/m <sup>2</sup> /dzień

## Wybrane zagadnienia projektowe

W Polsce obecnie nie są dostępne jednolite wytyczne projektowe dla systemów pływających wysp hydrofitowych. Dostępnych jest jednak wiele rekomendacji dedykowanych dla danych warunków klimatycznych, np. dla Nowej Zelandii ([https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment\\_id=1139](https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=1139)), a także rozwiązania systemowe komercyj-

**Rysunek 4**  
Parametry projektowe jakie należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu technologii pływających wysp hydrofitowych  
**Figure 4**  
Design parameters to consider when developing floating treatment islands technology



ne, np. EkoWyspa (<https://plywajacawy-spa.pl/>). Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury określono specyficzne parametry związane z technologią pływających wysp hydrofitowych (rys. 4), które powinny być brane pod uwagę podczas procesu ich doboru i projektowania.

Wśród materiałów wypornościowych do wykonania wyspy hydrofitowej (z ang. *buoyant materials*) dominują tworzywa sztuczne tj. polietylen (PE), polipropylen (PP), pianka poliuretanowa (PU) lub polialkohol winylowy (PVA), recyklingowy politereftalan etylenu (PET), polietylen o wysokiej gęstości (HDPE), lub polietylenotereftalan (PET). Z uwagi na ochronę środowiska przed zanieczyszczeniem mikroplastikami warto rozważyć stosowanie materiałów naturalnych tj. drewno, bambus, wiklina, czy korek. Należy przewidzieć kotwiczenie tratw do brzegu lub do dna zbiornika, aby zapobiec ich dryfowaniu. Mocowanie powinno mieć możliwość regulacji z uwagi na zmienność poziomu lustra wody (Karstens i in., 2021).

Rośliny można instalować na wyspach/matach z zastosowaniem podłoża (z ang. *substrate*) lub bezpośrednio bez dodatkowego materiału wypełniającego. W przy-

kładzie głębokość wody (z ang. *water depth*) w zbiorniku, w którym instalowany ma być system pływających wysp hydrofitowych powinna uniemożliwiać zakotwiczenie korzeni w osadach dennych. Z drugiej strony, minimalna głębokość powinna również zapobiec uszkodzeniu pływającej maty. Zbyt duża głębokość ma niekorzystny wpływ na skuteczność oczyszczania gdyż część wody przepływa poniżej strefy korzeniowej, nie mając kontaktu z ryzosferą (Tanner i Headley, 2011).

Procent pokrycia zbiornika roślinnością (z ang. *coverage ratio*) jest kolejnym istotnym czynnikiem, który determinuje dostępność światła oraz stężenie tlenu rozpuszczonego. Zaleca się stosować stopień pokrycia zbiornika w granicach 5–45% (Samal i in., 2021). Firma Floating Islands International, która dostarcza pływające wyspy dla celów komercyjnych (<https://www.floatingislandsinternational.com/>) sugeruje współczynnik pokrycia na poziomie 5–8% jako wystarczający do poprawy jakości wody.

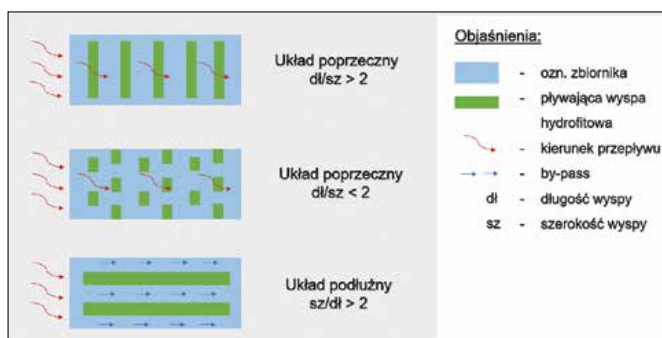
Gatunki roślin (z ang. *plant species*) stosowane w systemie pływających wysp hydrofitowych powinny charakteryzować się następującymi właściwościami:

- gatunki rodzime i nieinwazyjne,
- rośliny wieloletnie,
- gatunki roślin wodno-błotnych, wodnych lub wodolubnych,
- rośliny z rozwiniętą tkanką powietrzną (aerenchymą) (Wang i in., 2014).

Do najważniejszych parametrów roślinności należy głębokość i zasięg wiszącej strefy korzeniowej (z ang. *depth and extent of the hanging root-mat*), która rozwija się pod wyspą, co ostatecznie przekłada się na powierzchnię właściwą (m<sup>2</sup> strefy korzeniowej na m<sup>3</sup> objętości wody) biofilmu. Przykładowe gatunki roślin, które mogą być stosowane w systemach pływających wysp hydrofitowych klimatu umiarkowanego to trzcina pospolita, manna mielec, patka szerokolistna, patka wąskolistna, kosaciec żółty, turzycza, miskant chiński, wetiwera pachnąca i inne.

Wymiary układu (długość, szerokość, głębokość) oraz rozmieszczenie wysp są

istotne z punktu widzenia hydrauliki systemu. W celu osiągnięcia zamierzonych efektów oczyszczania ważne jest odpowiednie skonfigurowanie poszczególnych wysp (z ang. *configuration of floating mats*). Cały układ powinien być tak zaprojektowany, aby zminimalizować ryzyko krótkiego czasu kontaktu z wyspą i ograniczyć powstawanie stref martwych. W miarę możliwości należy projektować poprzeczne do kierunku przepływu pasy pływających wysp z zakotwiczeniem po obu stronach zbiornika – preferowane układy poprzeczne, jak pokazano na rys. 5. W układach podłużnych dochodzi do tworzenia się by-pass-ów, tzn. preferowany przepływ wody/ ścieków występuje przez strefy otwarte, w których nie występują dodatkowe opory przepływu.



**Rysunek 5**  
Rozwiązania układów pływających wysp hydrofitowych w rzucie zbiornika (opracowanie własne)  
**Figure 5** The floating treatment island configuration in the reservoir plan (own elaboration)

## Zakładanie wysp

Wyróżnia się dwa podejścia do zakładania pływających wysp hydrofitowych: (1) sadzenie i zakładanie w miejscu docelowym (*in situ*; bezpośrednio na tratwie pływającej) oraz (2) sadzenie i zakładanie wyspy na lądzie (*onshore*), a następnie transport pływającej wyspy hydrofitowej do miejsca docelowego. W przypadku zakładania wysp *in situ* (1) nie ma konieczności przenoszenia wysp, co zapobiega uszkodzeniu roślin podczas transportu, ponadto wyspy pokazanych rozmiarów charakteryzują duży ciężar, co może powodować trudności logistyczne i transportowe. Wadą rozwiązania jest konieczność ochrony nowo założonej wyspy przed zniszczeniem – np. przed ptactwem, w okresie rozruchu (przykładowy sposób ochrony przed zniszczeniem pływających wysp hydrofitowych przedstawiono na rys. 6).



**Rysunek 6**  
Przykład ochrony pływającej wyspy hydrofitowej przed zniszczeniem w okresie rozruchu (źródło: [https://harrisenvironmental.com.au/wp-content/uploads/2016/09/DSC\\_0205.jpg](https://harrisenvironmental.com.au/wp-content/uploads/2016/09/DSC_0205.jpg))  
**Figure 6** An example of protecting a floating treatment island against damage during the start-up phase (source: [https://harrisenvironmental.com.au/wp-content/uploads/2016/09/DSC\\_0205.jpg](https://harrisenvironmental.com.au/wp-content/uploads/2016/09/DSC_0205.jpg))

Korzyścią z sadzenia na lądzie (2) jest przede wszystkim prawidłowa kontrola rozwoju roślin w wczesnym etapie wzrostu, możliwość odchwasczania oraz kontrola przed zdegradowaniem. Dzięki temu, że wczesna pielęgnacja i utrzymanie roślinności są łatwiejsze, czas gotowości wyspy do użytku oraz czas rozruchu jest zdecydowanie krótszy.

## Podsumowanie

Pływające wyspy hydrofitowe są ekologicznym i skutecznym rozwiązaniem umożliwiającym ochronę wód. Mogą być łatwo instalowane na istniejących zbiornikach wodnych, nie wymagają specjalistycznej pielęgnacji, a dodatkowo łatwo wkomponowują się w istniejący krajo-

braz. Popularyzacja wysp hydrofitowych może ograniczyć eutrofizację wód spowodowaną dopływem związków biogenych. Dalsze prace powinny być skupione na rozwoju standardów i wytycznych dotyczących sposobu projektowania i doboru poszczególnych elementów systemu w odniesieniu do lokalnych warunków klimatycznych.

## Podziękowania:

Praca powstała w ramach realizacji Projektu Preludium 18 pt. „Badania nad procesami usuwania związków biogenych, wybranych metali ciężkich oraz arsenu w systemach pływających wysp hydrofitowych zasilanych sphywem powierzchniowym z terenów rolniczych i miejskich” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki [2019/35/N/ST8/O1134].

## ŹRÓDŁA:

- [1] Barco A., Bona S., Borin M., Plant species for floating treatment wetlands: A decade of experiments in North Italy, *Science of the Total Environment*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141666>
- [2] Colares G.S., Dell’Osbel N., Wiesel P.G., Oliveira G.O., Henrique P., Lemos Z., DaSilva F.P., Lutterbeck C.A., Kist L.T., Machado Ê.L., Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis, *Science of the Total Environment*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776A>.
- [3] Colares G.S., Dell’Osbel N., Barbosa C.V., Lutterbeck C., Oliveira G.A., Rodrigues L.R., Bergmann C.P., Lopez D.R., Rodriguez A.L., Vymazal J., Machado E.L., Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bio-energy generation, *Science of the Total Environment*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142474>
- [4] Dojlido J., Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków, 1999, ISBN: 83-213-4067-9, wyd. Arkady
- [5] Karathanasis, C. Potter, M. Coyne, Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater, *Ecol. Eng.* 2003, 20 (2), 157-169
- [6] Karstens S., Langer M., Nyunoya H., Čaraitė I., Stybel N., Razinkovas-Baziukas A., Bochet R., Constructed floating wetlands made of natural materials as habitats in eutrophicated coastal lagoons in the Southern Baltic Sea, *Journal of Coastal Conservation*, 2021, 25, 44, <https://doi.org/10.1007/s11852-021-00826-3>
- [7] Pavlineri N., Skoulikidis N. Th., Tsihrintzis V.A., Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis, *Chemical Engineering Journal*, 308, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.140>.
- [8] Samal, K., Kar, S., Trivedi, S. i in.. Assessing the impact of vegetation coverage ratio in a floating water treatment bed of *Pistia stratiotes*. *SN Appl. Sci.* 3, 120, 2021, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04139-2>
- [9] Shahid M.J., Arslan M., Ali S., Siddique M., Afzal M., Floating wetlands: an innovative tool for wastewater treatment, *Clean Soil Air Water*, 2018, <https://doi.org/10.1002/clen.201800120>
- [10] Tanner C.C., Kadlec R.H., Gibbs M.M., Sukias J.P., Nguyen M.L., Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands – influence of wastewater characteristics, *Ecological Engineering*, 2002, 18 (4), 499-520.
- [11] Tanner C.C., Headley T.R., Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants, *Ecological Engineering*, 37, 2011, 474-486, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.12.012>.
- [12] Wang C.Y., Sample D.J., Assessment of the nutrient removal effectiveness of floating treatment wetlands applied to urban retention ponds, *Journal of Environmental Management*, 137, 2014, 23-35, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.02.008>.
- [13] White, S.A., Plant Nutrient Uptake in Full-Scale Floating Treatment Wetlands in a Florida Stormwater Pond: 2016–2020. *Water*, 2021, 13, 569. <https://doi.org/10.3390/w13040569>