

Występowanie mikroplastików w słodkich wodach powierzchniowych

The occurrence of microplastics in fresh surface waters

BOŻENA MROWIEC

DOI 10.36119/15.2022.10.9

Artykuł przedstawia charakterystykę zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych – mikroplastików (MPs), ich występowanie w słodkich wodach powierzchniowych na różnych kontynentach oraz metody usuwania tych zanieczyszczeń z wody. Badania wskazują znacznie zróżnicowane zawartości MPs w wodach słodkich, od 10^{-2} do 10^8 cząstek/ m^3 . Z punktu widzenia wykorzystania wód powierzchniowych, jako wody przeznaczonej do spożycia, obecność MPs staje się wyzwaniem dla projektantów i technologów systemów oczyszczania wody. Do efektywnych sposobów usuwania MPs z wód zalicza się procesy membranowe i filtrację pospieszną. Metody chemiczne jak koagulacja, elektrokoagulacja czy zaawansowane utlenianie są udoskonalane w kierunku efektywnej eliminacji MPs. Problem zanieczyszczenia wód śródlądowych MPs wskazuje na podjęcie natychmiastowych działań w zakresie ograniczenia odprowadzania MPs do środowiska wodnego i efektywnego oczyszczania wody.

Słowa kluczowe: wody powierzchniowe śródlądowe, ujęcia wód, zanieczyszczenia z tworzyw sztucznych, mikroplastiki, metody usuwania mikroplastików

The paper presents characteristics of plastic pollutants – microplastics (MPs), their occurrence in fresh surface waters on different continents and methods of removing these pollutants from water. The investigations show the concentration of MPs varies considerably in fresh waters, from 10^{-2} to 10^8 particles/ m^3 . From the point of view of using surface waters as drinking water, the presence of MPs becomes a challenge for designers and technologists of water treatment systems. Effective methods of MPs removing from water include membrane processes and rapid filtration. Chemical methods such as coagulation, electrocoagulation and advanced oxidation are being refined towards the effective MPs elimination. The contamination of inland waters by MPs indicates that immediate actions are required to limit the discharge of MPs into the aquatic environment and effective water treatment.

Keywords: inland surface waters, water intakes, plastic pollution, microplastics, methods of microplastics removal

Wstęp

Produkcja plastiku na świecie każdego roku gwałtownie wzrasta, a szczególnie wyraźny wzrost wytwarzanych tworzyw sztucznych obserwowany jest po 2000 roku. Z 2 mln ton wyprodukowanych tworzyw sztucznych w 1950 r. produkcja wzrosła do 368 mln ton w 2019 r. Są to wartości dotyczące przemysłu tworzyw sztucznych i nie uwzględniają one włókien syntetycznych, co świadczy, że rzeczywista produkcja jest znacznie wyższa. Szacuje się, że produkcja w tym sektorze wzrośnie do około 600 milionów ton w 2025 roku [1]. Narastający problem zanieczyszczenia środowiska naturalnego plastikiem, wymusza wielokierunkowe działania w celu ograniczenia ilości powstających odpadów z tworzyw sztucznych oraz ich racjonalne utylizowanie. Cząstki tworzyw sztucznych występują w powietrzu, wodzie

i żywności, a ich wpływ na zdrowie ludzi nie jest jeszcze dokładnie rozpoznany. Problem ten jest szczególnie dyskutowany w odniesieniu do środowiska wodnego, w tym do wód powierzchniowych stanowiących ujęcia wody przeznaczonej do spożycia. Postępujące zanieczyszczenie wód mikroplastkami (MPs, cząstki < 5 mm) zostało uwzględnione w dokumentach prawnych, ale tylko w Europejskiej Strategii Morskiej Dyrektywa Ramowa. Szerokie zastosowanie tworzyw sztucznych powoduje, że stanowią one kluczowe znaczenie w wielu sektorach działalności gospodarczej, np. w transporcie, budownictwie, elektronice czy ochronie zdrowia. Tworzywa sztuczne są powszechnie stosowane do produkcji opakowań, części samochodów, produktów gospodarstwa domowego, sprzętu sportowego, zabawek, ubrań a także środków higienicznych i materiałów leczniczych. Najczęściej stosowanymi

tworzywami sztucznymi są: polietylen (PE), polipropylen (PP), polichlorek winylu (PVC), polistyren (PS) i politereftalan etylu (PET), poliuretan (PUR), które stanowią blisko 90% światowej produkcji [2]. Analizując skażenie środowiska zanieczyszczeniami z tworzyw sztucznych, wyróżnia się w kolejności malejącej, pod względem ilości występujących cząstek: PP, PE, PVC, PS, PUR i PET [3]. Problematyka zanieczyszczenia wód MPs, w tym wód słodkich (rzek i jezior) podnoszona jest coraz głośniejsze, ze względu na fakt wykorzystywania ich jako ujęcia wód przeznaczonych do spożycia. Ponadto zwraca się uwagę na potencjalne toksyczne oddziaływanie mikroplastików na organizmy żywe w ekosystemach wodnych. Doniesienia wskazują również na obecność cząstek MPs w wodzie przeznaczonej do spożycia [4, 5]. Pomimo, iż brak jest jednoznacznych dowodów szkodliwego wpływu MPs na zdrowie człowieka,

dr hab. inż. Bożena Mrowiec, prof. ATH <https://orcid.org/0000-0003-4227-5857> – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska, Bielsko-Biała, Autor do korespondencji/Corresponding author: bmrowiec@ath.bielsko.pl

istotną kwestią staje się pytanie, jaki wpływ na organizm ludzki wywierać będzie długoletnie pochłanianie MP, np. na skutek spożycia wody zanieczyszczonej takimi substancjami. Z tego względu, wydaje się ważnym zagadnieniem rozpoznanie i monitorowanie stanu zanieczyszczenia wód powierzchniowych MP oraz opracowanie skutecznych metod usuwania tego rodzaju zanieczyszczeń z wód. Celem tego artykułu jest prezentacja problemu na przykładzie badań i obserwacji prowadzonych na różnych kontynentach.

Rodzaje zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych i źródeł mikroplastiku

Biorąc pod uwagę wielkość cząstek tworzyw sztucznych stanowiących zanieczyszczenia środowiska wyróżnia się: makroplastik (> 25 mm); mezoplastik (5 – 25 mm); mikroplastik (0,1 µm – 5 mm) oraz nanoplastik (< 0,1 µm) lub ogólnie do mikroplastiku zalicza się cząstki tworzyw sztucznych o wymiarach < 5 mm [6, 7, 8]. W odniesieniu do źródeł MP uwalnianych do środowiska, w tym do wód, rozróżnia się źródła pierwotne (tzw. mikroplastik pierwotny) oraz źródła wtórne (tzw. mikroplastik wtórny). Źródłami pierwotnymi MP są wytwarzane produkty o małych rozmiarach cząstek, jak np. stosowane w przemyśle, produktach farmaceutycznych, kosmetykach, farbach, materiałach ściernych, czy pellety lub proszki do produkcji wyrobów z tworzyw. Mikroplastiki celowo dodawane do kosmetyków, środków higieny osobistej, chemii gospodarczej czy też farb, spływają do kanalizacji [9, 10, 11]. Źródłami wtórnymi MP są materiały z tworzyw sztucznych, które w wyniku rozdrobnienia większych elementów tworzą cząstki o rozmiarach < 5 mm. Wtórne MP powstają zazwyczaj już w środowisku, jako efekt procesów degradacji na skutek działania czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych [10, 11, 12]. Cząstki mikroplastiku mogą występować jako twarde elementy (granulat, kulki, odłamki plastiku), włókna (nici), folie (błony) oraz pianki. Mikroplastik wtórny stanowi wiele różnorodnych polimerów, natomiast pierwotny to głównie PE, PS i PP [11]. Literatura wskazuje liczne i różnorodne drogi transportu zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych do środowiska wodnego, w tym np. zaśmiecanie, depozycja atmosferyczna, spływy powierzchniowe z terenów zurbanizowanych, ścieki bytowe i przemysłowe, czy też bezpośrednie straty z boi, łodzi, sieci i innych obiektów wodnych [6, 13, 14, 15]. Oczyszczal-

nie ścieków uznawane są jako znaczące źródła ładunku MP do wód śródlądowych. Według Venghaus i Barjenbruch [2] ładunek mikroplastiku pochodzący z produktów higieny osobistej wprowadzany do ścieków wynosi ok. 7,5 g/osobę · rok. W ściekach znaczący udział stanowią MP w postaci włókien uwalnianych z odzieży i innych wyrobów włókienniczych. Pranie 6 kg tekstyliów syntetycznych może uwolnić (zależnie od warunków prania) do 739 000 włókien, natomiast jedna nowa bluzka ze 100 % poliestru traci podczas pierwszego prania do 0,4 % masy [10, 16]. Z tego względu efektywność procesów oczyszczania ścieków, w zakresie usuwania mikroplastiku pierwotnego i wtórnego, ma bardzo istotne znaczenie dla ochrony odbiorników. Według Sun i in. [17] oczyszczanie wstępne pozwala na usunięcie 50 – 98 % cząstek. MP są zatrzymywane są w procesie odfłuszczenia ścieków i usuwania flotujących zawiesin (usuwane są lekkie, pływające cząstki), w procesie sedimentacji w osadnikach wstępnych (usuwane są MP ciężkie i uwięzione w zawieszynie organicznej). W procesie biologicznego oczyszczania usuwanie cząstek zachodzi na skutek uwięzienia MP w kłaczkach osadu czynnego (w tym spożycie przez pierwotniaki), a także na skutek dozowania środków wspomagających – koagulantów i flokulantów, które zwiększają aglomerację cząstek tworzyw sztucznych [11, 17]. Dwustopniowe, mechaniczno-biologiczne oczyszczanie ścieków według różnych danych pozwala uzyskać nawet do 99,9 % usunięcia MP [18, 19], chociaż znaczna grupa badaczy wskazuje, że dopiero trójstopniowy proces oczyszczania ścieków pozwala na osiągnięcie wysokiej efektywności usuwania MP [13, 17, 20]. Dane literaturowe wskazują na bardzo zróżnicowaną ocenę udziału oczyszczalni ścieków w doprowadzaniu ładunku mikroplastików do wód powierzchniowych. Niemniej jednak zaznaczyć należy, że wielkość ładunku mikroplastików odprowadzanych do wód z oczyszczalni zależy również od wielkości obiektu. Według niektórych badaczy nie ma bezpośredniego związku między zanieczyszczeniami z tworzyw sztucznych w rzekach i oczyszczalniami ścieków [18, 21]. Wynika to głównie z faktu, że większość rzek o wysokim wskaźniku występowania plastikowych zanieczyszczeń znajduje się w pobliżu dużych ośrodków miejskich i zawartość MP jest efektem transportu tych zanieczyszczeń wraz ze spływami powierzchniowymi do wód powierzchniowych. Ocena udziału spływów powierzchniowych w transporcie ładunku

MP do wód powierzchniowych jest trudna do oszacowania, ale jak podkreślają naukowcy, może on stanowić bardzo znaczący udział w transporcie tych zanieczyszczeń. W tym zakresie znaczenie mają również spływy z terenów rolniczych, na których wykorzystywane są osady ściekowe do nawożenia gleb. Oszacowano, że przyrodnicze zagospodarowanie osadów ściekowych, w przypadku oczyszczalni o przepływie ścieków 10000 m³/d, każdego dnia z osadami doprowadza ok. 4,6 · 10⁸ cząstek MP do środowiska gruntowego. Przeciętna zawartość MP w osadach może wahać się w zakresie od 10³ do 170,1 · 10³ cząstek/kg_{sm} [13, 14, 18, 22].

Mikroplastiki w wodach rzek i jezior

W wodach powierzchniowych słodkich stwierdzane są dość znaczne ilości MP w formie różnorodnych mikrodrobin czy włókien. Jednak badania monitoringowe wód śródlądowych prowadzone są w znacznie ograniczonym stopniu w porównaniu z wodami morskimi. Przeprowadzone badania w Azji, Europie czy w Ameryce Północnej wykazały występowanie cząstek MP w ilościach istotnie różniących się ich zawartością w wodach. Zawartości MP, podawane jako liczba cząstek, obejmowały dziesięć rzędów wielkości, bo od 10⁻² do 10⁸ cząstek/m³ wody [1, 23, 24, 25]. Mikroplastiki występujące w wodach słodkich charakteryzują się także dużą różnorodnością, jeżeli chodzi o wielkość cząstek i właściwości fizyczne. Przykładowo, dla porównania mikroplastiki ze ścieków są silnie zanieczyszczone substancjami organicznymi, natomiast w czystych wodach słodkich są prawie wolne od materii organicznej i ledwo widoczne gołym okiem. Wody w pobliżu obszarów o wysokim stopniu zurbanizowania cechuje zazwyczaj wyższa zawartość różnorodnych MP [22]. Baldwin i in. [15] stwierdzili obecność MP w jeziorach USA w zakresie od 0,44 – 9,7 cząstek/m³. Największy udział stanowiły włókna (68,9%), fragmenty (15,6%), folie (8,9%), pianki (6,5%) oraz granulki (0,1%). Większość analizowanych MP (73,1%) charakteryzowała się wielkością w zakresie 355 – 1000 µm, 26, 5% miało wymiary 1000 – 5600 µm, a tylko 0,4% było większych niż 5600 µm. Również w innych częściach świata nie brakuje przykładów badań dotyczących zawartości MP w wodach powierzchniowych śródlądowych. Przykładowe wartości przedstawiają się następująco: Antua

River (Portugalia) – 58-1265 cząstek/m³ [26]; Seine River (Francja) – 0,28 – 47 cząstek/m³ [27]; Nakdong River (Korea Południowa) – 83 – 5242 cząstek/m³ [28]; Ulsanhai Lake (Chiny) – 1760 – 10120 cząstek/m³ [29]. Należy zwrócić uwagę, że badania zawartości MPs wykonane w ostatnich 5 latach wskazują na znacznie wyższe zawartości tych cząstek w wodach słodkich, niż w przypadku badań prowadzonych ok. 10 lat wcześniej. Wynika to z faktu, że obecnie oznaczane są już mikroplastiki z zakresu nanocząstek, stąd też ich zawartość w przeliczeniu na sztuki jest znacznie wyższa. W Polsce problem obecności MPs w wodach jest jeszcze mało rozpoznany. Chociaż sądzić można, że zanieczyszczenie wód powierzchniowych MPs nie będzie istotnie odbiegało od wartości prezentowanych w literaturze. Wstępne badania dotyczące występowania MPs w wodach zlewni Kłodnicy prowadzili Nocoń i in. [6] wskazując ogólnie na ich pochodzenie z odpływów z oczyszczalni ścieków. Połec i in. [30] analizowały zawartość MPs w wodzie Wisły (Kraków) i w wodzie podziemnej. Wyniki badań wykazały zawartość MPs zarówno w wodzie rzecznej jak i podziemnej, jednak ze względu na zbyt małą ilość analizowanych próbek oraz wstępny charakter badań nie można przedstawić precyzyjnej oceny sytuacji.

Sposoby usuwania mikroplastików z wód

Zanieczyszczenie środowiska, w tym wód słodkich, mikroplastikami jest istotnym problemem ekologicznym. Dlatego, poza ograniczaniem emisji zanieczyszczeń z tworzyw sztucznych, istotnym zagadnieniem jest stosowanie efektywnych metod oczyszczania wody. Poniżej krótko przedstawiono metody i sposoby, które są rozważane i udoskonalane w kierunku efektywnej eliminacji MPs z wód.

Degradacja biologiczna i spożywanie przez organizmy wodne

W literaturze pojawiają się doniesienia o współdziałaniu mikroorganizmów, głównie w odniesieniu do środowisk morskich, w degradacji mikroplastików. Badano adsorpcję mikroorganizmów na cząstkach MPs i obecność związków biologicznie czynnych na powierzchni tych cząstek. Analizy FTIR potwierdzały zachodzące procesy utleniania na powierzchni MPs polietylenowych [31]. W odniesieniu do środowisk morskich analizowano również zjawisko sorpcji mikroplastików na

powierzchni alg morskich i wodorostów. Badania wykazały, że istotne znaczenie dla sorpcji ma ładunek powierzchniowy tworzywa. Cząstki charakteryzujące się dodatnim ładunkiem powierzchniowym były w większym stopniu adsorbowane w porównaniu do cząstek MPs o ładunku powierzchniowym ujemnym [32]. Drugim kierunkiem badań jest spożywanie MPs przez organizmy wodne, np. zooplankton czy małże i może to być rozważane w zakresie możliwości usuwania tego rodzaju zanieczyszczeń. Jednak w odniesieniu do wód słodkich takich badań nie prowadzono.

Filtracja

Proces filtracji rozważany jest często w odniesieniu do usuwania MPs ze ścieków po procesie biologicznego oczyszczania, jako trzeci etap w układzie technologicznym. Zastosowanie filtracji pospiesznej poprawia efekt oczyszczania ścieków, a w kontekście usuwania MPs efektywność oczyszczania zwiększa się do ponad 97 % przy zastosowaniu filtru piaskowego [13] i do 98,5 % w przypadku zastosowania filtru dyskowego o średnicy porów 10 µm [20].

Procesy membranowe

Mikrofiltracja membranowa uznawana jest za wszechstronną technologię w oczyszczaniu wód i ścieków. Z tego względu przypuszcza się, że jej zastosowanie z wykorzystaniem różnych membran, do usuwania MPs będzie wzrastało w kolejnych latach. Efektywność mikrofiltracji szacuje się w zakresie 95 – 100 % [33]. Metodą tą można usuwać MPs do poziomu nanocząstek, co ma znaczenie dla produkcji wody przeznaczonej do spożycia [34, 35].

Zaawansowane utlenianie

Proces chlorowania przyczynia się do degradacji mikroplastików, jednak w wielu przypadkach nie powoduje całkowitego ich utlenienia. W efekcie proces ten powoduje głównie zwiększenie liczebności cząstek tworzyw sztucznych o mniejszych wymiarach. Efekty degradacji nie zachodzą w przypadku polipropylenu, nawet przy zastosowaniu dużych dawek utleniacza i długiego czasu ekspozycji [36]. Podobne zjawisko tylko częściowej degradacji zaobserwowano w przypadku działania promieniowaniem UV na cząstki tworzyw sztucznych. Po naświetlaniu powierzchnia MPs stawała się szorstka, popękana i ziarnista. Efektami degradacji były tamliwe płatki, a to przyczyniało się do zwiększenia liczby mniejszych cząstek, nawet w skali nano [37].

Metody chemiczne (koagulacja)

Koagulanty glinu i żelaza w różnicowanym zakresie wykazują zdolność usuwania MPs. Stwierdzono jednak, że lepszą efektywnością charakteryzują się koagulanty glinowe. Efektywność usuwania cząstek MPs zależy od dawki koagulantu, wielkości usuwanych cząstek i w pewnym stopniu od pH procesu, szczególnie w odniesieniu do mniejszych cząstek (< 0,5 mm). Uzyskaną efektywność usuwania MPs w procesie koagulacji określono w zakresie 25,8 – 61,2 %. Na istotny wzrost efektywności procesu koagulacji w odniesieniu do cząstek < 0,5 mm wpływ ma także dodatek anionowego poliakrylamidu (15 mg/l) [38]. Prowadzone są również badania w zakresie zastosowania elektrokoagulacji do usuwania MPs z wód. Technika ta pozwala ograniczyć ilość powstających osadów, zwiększyć efektywność energetyczną i jest łatwa w zakresie automatyzacji procesu. Tworzenie wodortlenków metali zachodzi w wyniku uwalniania kationów Al³⁺ oraz Fe²⁺ z elektrod do wody zawierającej jony hydroksylowe. Badania laboratoryjne wskazują na skuteczność tego procesu w usuwaniu MPs do 99,2% [12].

Podsumowanie

Badania zawartości i charakterystyka MPs w wodach powierzchniowych rzek i jezior są czasochłonne i kosztowne. To w głównej mierze powoduje, że nie są one prowadzone systematycznie, a często prowadzą się do jednorazowego lub krótkotrwałego okresu prowadzonych analiz. Z tego względu przyjąć można, że prezentowane w literaturze wyniki są w dużej mierze wartościami tylko szacunkowymi. W Polsce zjawisko to nadal nie jest oszacowane, a przeprowadzone dotychczas badania można określić symbolicznie. Niemniej jednak, ze względu na nasilający się problem postępującego zanieczyszczenia wód słodkich MPs, coraz częściej podnosi się temat włączenia tego typu zanieczyszczeń do badań monitoringowych wód. To jednak wymaga opracowania dokładnych procedur w zakresie poboru prób i metodologii analitycznej. Drugim istotnym zagadnieniem jest stosowanie efektywnych technologii oczyszczania, zarówno w odniesieniu do ścieków, w celu ograniczenia wprowadzania MPs do odbiorników, jak również w oczyszczaniu wody. Stosowane standardowe procesy technologiczne oczyszczania wody nie zapewniają skutecznej eliminacji MPs, szczególnie tych o bardzo małych rozmiarach cząstek. W tym zakresie wydaje się

być jak dotąd, pewną metodą filtracji membranowa. Jednak koszty produkcji wody, w przypadku stosowania procesów membranowych w standardowych układach oczyszczania, mogłyby znacząco wzrosnąć.

LITERATURA

- [1] Du S., Zhu R., Cai Y., Xu Y., Yap P.S., Zhang Y., He Y., Zhang Y. Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: a review. *RCS Advances* 2021, 11, 15762-15784.
- [2] Venghaus D., Barjenbruch M. Microplastics in urban water management. *Technical Transactions*. 2017, 1, 137-146.
- [3] Plastics Europe. Annual report 2019 (<https://plasticseurope.org/pl/knowledge-hub/plasticseurope-polska-annual-report-2019>)
- [4] Pivokonsky M., Cermakova L., Novotna K., Peer P., Gajthaml T., Janda V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment* 2018, 643, 1644-1651.
- [5] Mintening S.M., Löder M.G., Primpke S., Gerdtz G. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the Total Environment*. 2019, 648, 631-635.
- [6] Nocoń W., Moraczewska-Majkut K., Wiśniowska E. Mikroplastik w wodach powierzchniowych – problem i wyzwania. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2018, 8, 304-308.
- [7] Yu Y., Zhou D., Li Z., Zhu C. Advancement, and challenges of microplastic pollution in the aquatic environment: a review. *Water Air Soil Pollution* 2018, 229, 140.
- [8] Farias J.P., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*. 2019, 138, 145-147.
- [9] Peters C.A., Bratton S.P. Urbanization is a major influence on microplastic ingestion by sunfish in the Brazos River Basin, Central Texas, USA. *Environmental Pollution* 2016, 210, 380-387.
- [10] Meng Y., Kelly F.J., Wright S.L. Advances and challenges of microplastic pollution in freshwater ecosystems: A UK perspective. *Environmental Pollution* 2020, 256, 113445. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113445>
- [11] Mrowiec B. Problem obecności mikroplastiku w ściekach i osadach ściekowych. Zagrożenia i zarządzanie w gospodarce wodno-ściekowej XXI wieku – wybrane problemy. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, 2021, 17-31.
- [12] Padervand M., Lichtfouse E., Didier R., Wang C. Removal of microplastics from the environment. A review. *Environmental Chemistry Letters* 2020, 18, 807-828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
- [13] Michielssen M.R., Michielssen E.R., Niac J., Duhaime M.B. Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2016, 2 (6) 1064-1073.
- [14] Mintening S.M., Int-Veen I., Loder M.G., Primpke S., Gerdtz G. Identification of microplastic in effluents of wastewater treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research* 2017, 108, 365-372.
- [15] Baldwin A.K., Spanjer A.R., Rosen M.R., Thom T. Microplastics in Lake Mead National Recreation Area, USA: Occurrence and biological uptake. *PLoS ONE* 2020, 15, 5: e0228896. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228896>
- [16] Habib R.Z., Thiemann T., Al Kendi R. Microplastics and wastewater treatment plants – A review. *Journal of Water Resource and Protection* 2020, 12, 1-35.
- [17] Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M.C., Ni B. Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Research* 2019, 152, 21-37.
- [18] Carr S.A., Liu J., Tesoro A.G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*. 2016, 91, 174-182.
- [19] Wiśniowska E., Nocoń W., Moraczewska-Majkut K. Mikroplastik w ściekach i osadach ściekowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2018, 7, 269-275.
- [20] Talvitie J., Mikola A., Koistinen A., Setälä O. Solution to microplastic pollution – removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res.* 2017a, 123, 401-407.
- [21] Estahbanati S., Fahrenfeldt N.L. Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water. *Chemosphere* 2016, 162, 277-285.
- [22] Li J., Liu H., Chen J. P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research* 2018, 137, 362-374.
- [23] Koelmans A.A., Nor N.H., Hermens E., Kooi M., Mintenig S.M., De France J. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research* 2019, 155, 410-422.
- [24] Rios Mendoza L.M., Balcer M. Microplastics in freshwater environments: A review of quantification assessment. *Trends in Analytical Chemistry* 2019, 113, 402-408.
- [25] Issac M.N., Kandasubramanian B. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research* 2021, 28, 19544-19562.
- [26] Rodrigues M.O., Abrantes N., Goncalves F.J., Nogueira H., Marques J.C., Goncalves A. M. Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antua River, Portugal). *Sci. Total Environ.* 2018, 633, 1549-1559.
- [27] McCormick A.R., Hoellein T.J., London M.G., Hittie J., Scott J.W., Kelly J.J. Microplastic in surface waters of urban rivers: concentration, sources, and associated bacterial assemblages. *Ecosphere* 2016, 7 (11) 1556.
- [28] Eo S., Hong S.H., Song Y.K., Han G. M. Shim W. J. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea. *Water Res.* 2019, 160, 228-237.
- [29] Wang Z.C., Qin Y. M., Li W. P., Yang W. H., Meng Q., Yang J. L. Microplastic contamination in freshwater: first observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China. *Environ. Chem. Lett.*, 2019, 17 (4) 1821-1830.
- [30] Poleć M., Aleksander-Kwaterczak U., Wątor K., Kmiecik E. The occurrence of microplastics in freshwater systems – preliminary results from Krakow (Poland). *Geology, Geophysics and Environment* 2018, 44 (4) 391-400.
- [31] Tofa T.S., Kunjali K.L., Paul S., Dutta J. Visible light photocatalytic degradation of microplastics residues with zinc oxide nanorods. *Environ. Chem. Lett.* 2019, <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00859-z>
- [32] Nolte T.M., Hartmann N.B., Kleijn J.M., Garnes J., van de Meent D., Hendriks A.J., Baun A. The toxicity of plastic nanoparticles to green algae as influenced by surface modification, medium hardness and cellular adsorption. *Aquat. Toxicol.* 2017, 183, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.aquat.2016.12.005>
- [33] Yahyanezhad N., Bardi M.J., Aminirad H. An evaluation of microplastics fate in the wastewater treatment plants: frequency and removal of microplastics by microfiltration membrane. *Water Practice and Technology* 2021. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.036>
- [34] Poerio T., Piacentini E., Mazzei R. Membrane processes for microplastic removal. *Molecules* 2019, 24, 4148. <https://doi.org/10.3390/molecules24224148>
- [35] Ma B.W., Hue W.J., Hu C.Z., Liu H.J., Qu J.H., Li I.L. Characteristics of microplastics removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chem. Eng. J.* 2019, 359, 159-167.
- [36] Liu W., Zhang J., Liu H., Guo X., Zhang X., Yao X., Cao Z., Zhang T. A review of the microplastics in global wastewater treatment plants. Characteristics and mechanisms. *Environment International* 2021, 146, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277>
- [37] Cai L.Q., Wang J.D., Peng J.P., Wu Z.Q., Tan X.L. Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments. *Sci. Total Environ.* 2018, 628, 740-747. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.079>
- [38] Ariza – Tarazona M.C., Villarreal-Chiu J.F., Barbieri V., Siligardi C., Cedillo-Gonzalez E.I. New strategy for microplastic degradation: green photocatalysis using a protein-based porous N-TiO₂ semiconductor. *Ceram. int.* 2019, 45 (7) 9618-9624. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.208>