

# Występowanie mikroplastików (MPs) w odciekach ze składowisk odpadów komunalnych

The occurrence of microplastics (MPs) in leachates from municipal solid waste landfills

RAFAŁ NOWAK

DOI 10.36119/15.2025.10.11

Składowiska odpadów komunalnych stanowią istotne źródło wtórnego skażenia środowiska cząstkami mikroplastików (MPs). Migracja drobin tworzyw sztucznych z nagromadzonych odpadów może wywierać negatywny wpływ zarówno na organizmy żywe, jak i całe ekosystemy. Opady atmosferyczne przesiąkające przez warstwy odpadów prowadzą do wymywania substancji szkodliwych, w tym mikrozanieczyszczeń. W niniejszym artykule przybliżono problematykę związaną z występowaniem MPs w odciekach pochodzących ze składowisk odpadów komunalnych oraz ich potencjalnego wpływu na środowisko.

*Słowa kluczowe: mikrozanieczyszczenia, mikroplastiki (MPs), ocieki składowiskowe, składowiska odpadów komunalnych*

Municipal solid waste landfills represent a significant source of secondary environmental contamination by microplastic (MP) particles. The migration of plastic debris from accumulated waste can have harmful effects on both living organisms and entire ecosystems. Rainwater percolating through waste layers leads to the leaching of hazardous substances, including micropollutants. This article addresses the issue of MP presence in leachates originating from municipal waste landfills and their potential environmental impact.

*Keywords: micropollutants, microplastics (MPs), landfill leachate, municipal solid waste landfills*

## Wprowadzenie

Składowanie jest powszechnie praktykowaną metodą zagospodarowania stałych odpadów komunalnych. Zdeponowane odpady to mieszanina frakcji organicznych i nieorganicznych, stanowiąca bogate źródło pierwiastków biogennych oraz związków odżywczych dla mikro- i makroorganizmów. To sprawia, że składowiska komunalne postrzegane są jako bioreaktory, w których w trakcie eksploatacji, jak również po zakończeniu deponowania odpadów, zachodzą złożone przemiany fizyko-biologiczno-chemiczne. Na przebieg i intensywność tych procesów wpływa szereg czynników, w tym między innymi: ilość i rodzaj gromadzonych odpadów, wiek składowiska, warunki klimatyczne, intensywność opadów atmosferycznych i związane z tym powstawanie odcieków składowiskowych. W kontekście możliwości przedostania się

odcieków do środowiska gruntowo-wodnego i potencjalnego skażenia gleby i warstw wodonośnych, należy zwrócić szczególną uwagę na specyficzne, szkodliwe związki występujące w odciekach, w tym mikrozanieczyszczenia (Nowak, Włodarczyk-Makuła 2020; Nowak 2022). Spośród licznych rodzajów mikrozanieczyszczeń obecnych w specyficznych wodach odpadowych należy wyróżnić mikroplastiki (MPs).

Mikroplastiki to niejednorodna mieszanina drobnych frakcji tworzyw sztucznych o wielkości cząstek od 0,1  $\mu\text{m}$  do 5 mm (Singh i in. 2021), frakcje mniejsze od 0,1  $\mu\text{m}$  zaliczane są do nanoplastików, natomiast większe do makroplastików.

Dokładny mechanizm oddziaływania MPs na środowisko nie jest w pełni poznany, podobnie jak długofalowy wpływ ekspozycji tych związków na organizmy żywe. Jednak zwraca się uwagę na potencjalne problemy odnoszące się do

(Cole i in. 2011; Wiśniowska i in. 2018; Blackburn, Green 2022; Szal i in. 2023):

- negatywnego wpływu na zdrowie i/lub zaburzeń fizjologicznych - mikroplastik pomyłony z pożywieniem i połknięty przez organizmy (ryby, skorupiaki, ptaki) może prowadzić do skażeń, uszkodzeń i zatorów przewodu pokarmowego, uczucia sytości przy jednoczesnym niedoborze substancji odżywczych w organizmie (niedożywienie) oraz zaburzeń wzrostu i reprodukcji; obecność drobin mikroplastików w powietrzu może zakłócać funkcje oddychania, a substancje chemiczne na jego powierzchni, mogą zakłócać procesy metaboliczne, negatywnie wpływać na rozwój płodów, prowadzić do uszkodzeń układu nerwowego, hormonalnego oraz immunologicznego, płodu i zwiększać ryzyko alergii a także chorób autoimmunologicznych;

dr inż. Rafał Nowak <https://orcid.org/0000-0002-3543-7363>; Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Katedra Sieci i Instalacji Sanitarnych. Adres do korespondencji/ Corresponding author: rafal.nowak@pcz.pl

- trudności w usuwaniu ze środowiska - brak metod i/lub niska skuteczność usuwania MPs z poszczególnych elementów środowiska;
- bioakumulacji - mikrozanieczyszczenia odkładane są w tkankach i narządach organizmów żywych oraz są przenoszone za pośrednictwem łańcucha pokarmowego na wyższe poziomy troficzne - może dochodzić do spożycia MPs przez ludzi, wskutek zjedzenia skażonych produktów;
- toksyczności chemicznej - MPs może adsorbować na swojej porowatej powierzchni inne szkodliwe substancje, takie jak metale ciężkie oraz trwałe zanieczyszczenia organiczne (PFAS), które po dostaniu się do organizmów wywołują zaburzenia hormonalne (bisfenol A, ftalany) i/lub uszkodzenia komórek oraz DNA (stres oksydacyjny);
- nieuregulowanego stanu prawnego i braku standaryzacji metod analitycznych - brak norm prawnym określających dopuszczalne stężenia MPs w poszczególnych elementach środowiska oraz brak jednolitej, obowiązkowej metody identyfikacji ilościowo-jakościowej MPs, zapewniającej możliwość porównywania uzyskiwanych danych.

## Przegląd metod identyfikacji mikroplastików

Skuteczna detekcja i rozpoznawanie MPs odgrywają istotną rolę w ocenie ilościowo-jakościowej drobin tworzyw sztucznych w różnych komponentach środowiska. Do analizy stężenia mikroplastików w odciekach wykorzystuje się szereg technik badawczych, spośród których najczęściej stosowane to:

- spektroskopia Ramana - technika polegająca na analizie rozproszenia światła laserowego - jest to metoda zalecana przy analizowaniu próbek zawierających wysokie stężenia zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych, pozwala ona na uzyskanie informacji o strukturach chemicznych, co ułatwia identyfikację genealogii zanieczyszczenia (Araujo i in., 2018);
- spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR) - jest to popularna metoda analityczna, bazująca na pomiarze absorpcji promieniowania podczerwonego przez wiązania chemiczne charakterystyczne dla cząstek plastików (Li i in., 2018);
- mikroskopia optyczna, fluorescencyjna i skaningowa (SEM) - metody mikroskopowe pozwalające na ocenę

- organoleptyczną kształtu, cech morfologicznych, barwy, wielkości i struktury mikroplastików, dzięki czemu możliwe jest określenie źródła jego pochodzenia (Rochman i in., 2016; Jutrzenka-Trzebiatowska i in. 2023);
- spektrometria mas (MS) - pozwala na określenie masy cząsteczkowej składników mikroplastików, wspomagając tym samym wyniki uzyskane z innych metod analitycznych (Jutrzenka-Trzebiatowska i in. 2023);
- analiza termiczna - próbka poddawana jest stopniowemu podgrzewaniu, co prowadzi do rozkładu termicznego materiałów polimerowych. Analiza tych zmian pozwala określić skład chemiczny i stopień degradacji mikroplastików (Suaria i in., 2016);
- wysokosprawną chromatografię cieczową (HPLC) - technika ta służy do rozdzielenia i identyfikacji składników mikroplastików na podstawie ich rozpuszczalności w określonych rozpuszczalnikach (Cole i in., 2011).

## Obecność mikroplastików w odciekach

Migracja drobin tworzyw sztucznych w środowisku związana jest z ich pochodzeniem i może mieć charakter pierwotny lub wtórny (Wiśniowska i in. 2018). Pierwotne pochodzenie MPs związane jest z celową produkcją. Mogą one być wytwarzane jako granulki, włókna, kulki, peletki oraz płatki i są wykorzystywane najczęściej jako dodatki do produktów higieny osobistej, kosmetyków peelujących, jak również w pastach do zębów, środkach czyszczących oraz detergentach jako czynnik ścierny. Wtórne zanieczyszczenie MPs związane jest głównie ze zjawiskiem rozpadu większych fragmentów tworzyw, pod wpływem działania sił zewnętrznych.

Zużyte tworzywa sztuczne, pomimo narzuconych wymogów recyklingu, trafiają na składowiska odpadów komunalnych, gdzie podobnie jak reszta odpadów poddawane są interakcjom o charakterze fizycznym, chemicznym i biologicznym. Z uwagi na rozmiar i ciężar właściwy, MPs łatwo wymywane są z warstw odpadów. Na skutek migracji wód odpadowych, wypłukiwane są ze składowiska i wraz z substancjami rozpuszczonymi w wodzie oraz zawiesinami tworzą odcieki.

W odciekach składowiskowych, podobnie jak w wielu innych elementach środowiska, obserwuje się wzrostową tendencję stężeń MPs. Wynika to z jednej

strony z coraz większej ilości produkowanych i zużywanych tworzyw sztucznych, a z drugiej z dokładniejszymi metodami pomiarowymi, wykorzystywanymi do detekcji tych mikrozanieczyszczeń.

Trihadiningrum i in. (2023) prowadzili badania nad obecnością MPs w odciekach z aktywnego składowiska Randegan, na którym gromadzone są odpady komunalne miasta Mojokerto w Indonezji. Oprócz określenia poziomu stężenia mikroplastików w odciekach surowych, badacze oceniali skuteczność usuwania tych mikrozanieczyszczeń w konwencjonalnej oczyszczalni odcieków (LTP - ang. Leachate Treatment Plant) wchodzącej w skład infrastruktury. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono, że MPs występowały w odciekach surowych, w średnim stężeniu wynoszącym  $9,0 \pm 0,85$  cz./dm<sup>3</sup> a dominującą frakcją stanowiły drobiny o uziarnieniu  $350 \leq 1000$   $\mu\text{m}$  (ponad 64%). W badanych próbkach przeważały włókna (64,44%) i cząstki (28,89%). Z kolei w odciekach oczyszczonych stężenie MPs wynosiło średnio  $2,20 \pm 0,28$  cz./dm<sup>3</sup>, co odpowiadało skuteczności usuwania MPs przez LTP na poziomie 75,6%. W identyfikacji drobin mikroplastików korzystano ze spektrometrii FTIR.

Badania zawartości MPs w odciekach pochodzących z sześciu składowisk odpadów komunalnych w Hongkongu (Qin i in. 2024) wykazały, że najwyższe stężenie drobin tworzyw sztucznych, wynoszące  $507,6 \pm 37,3$  cz./dm<sup>3</sup>, odnotowano w odciekach z eksploatowanego składowiska. W odciekach tych przeważały formy tworzyw sztucznych o rozmiarze 100 - 200  $\mu\text{m}$  ( $344,0 \pm 4,97$  cz./dm<sup>3</sup>) oraz 200 - 500  $\mu\text{m}$  ( $147,5 \pm 32,2$  cz./dm<sup>3</sup>). Natomiast w przypadku pięciu zamkniętych składowisk stężenie tego typu mikrozanieczyszczeń było znacząco niższe i wynosiło od 49,0 do 128,3 cz./dm<sup>3</sup>. W odciekach tych dominowały cząstki MPs o wielkości 100 - 500  $\mu\text{m}$  (głównie PET i PE). Przeprowadzone badania wykazały zależność pomiędzy wiekiem składowiska, a stężeniem mikroplastików w odciekach.

W badaniach prowadzonych przez He i in. (2019), z wykorzystaniem odcieków pochodzących z czterech aktywnych i dwóch zamkniętych składowisk komunalnych w Shanghaju (Chiny), wykazano, że stężenie MPs zawierało się w przedziale 0,42 - 24,58 cz./dm<sup>3</sup> i przeważały frakcje (PE, PP) o rozmiarach cząstek 100 - 1000  $\mu\text{m}$  (prawie 77,5%). Autorzy badań zwrócili uwagę, że wykryte stężenie mikroplastików w badanych odciekach było

znacznie wyższe niż w przypadku analogicznych badań prowadzonych z wykorzystaniem odcieków pochodzących z krajów nordyckich (0 - 4,51 cz./dm<sup>3</sup>) (Praagh i in., 2018).

Doświadczenia prowadzone przez Mohammadi i in. (2022) wykazały, że ilość mikroplastików w próbkach odcieków pochodzących ze składowiska w Buszehr (Iran) była uzależniona od pory roku i wahała się od 63 do 92 cz./dm<sup>3</sup> (średnio 79,2 cz./dm<sup>3</sup>), przy czym najniższe stężenie drobin tworzyw sztucznych odnotowano zimą (średnio 65,67 cz./dm<sup>3</sup>), a najwyższe latem (średnio 92,0 cz./dm<sup>3</sup>). W odciekach przeważały formy o wielkości > 1000 µm, a dominującymi kształtami były włókna i cząstki. Należy podkreślić, że składowisko Buszehr nie posiada barier ochronnych pod dnem składowiska i powstające odcieki bez żadnych ograniczeń migrują do gruntu i wód podziemnych. Ma to szczególne znaczenie ze względu na bliskie położenie składowiska względem linii brzegowej Zatoki Perskiej i związanego z tym zagrożenia skażeniem wód morza śródziemnego.

W doświadczeniach prowadzonych przez Rahmana i in. (2024) koncentrowano się na zagrożeniu rozprzestrzeniania się mikroplastików z odcieków składowiska odpadów komunalnych w Amin Bazar (Dhaka, Bangladesz) do wód powierzchniowych i podziemnych. Z wytypowanych do badań próbek odcieków usuwano substancje organiczne i oddzielano frakcje stałe. W tym celu zastosowano proces utleniania z użyciem odczynnika Fentona przez 30 minut (Fe<sup>2+</sup> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, przy wartości pH = 3), w temperaturze 60°C, a następnie separację gęstościową (nasycony roztwór ZnCl<sub>2</sub>) do oddzielenia cząstek nieorganicznych oraz filtracji na sitach stalowych i papierze filtracyjnym. Tak przygotowane próbki MP rozpoznawano pod kątem ilościowo-jakościowym, z wykorzystaniem obserwacji mikroskopowej (kształt drobin), spektrometrii FTIR (identyfikacja polimerów) oraz obrazowaniem mikroskopią skaningową SEM (morfologia powierzchni). Przeprowadzony eksperyment wykazał, że stężenie MP w odciekach surowych wynosiło średnio 370 ± 16 cz./dm<sup>3</sup>, a w odciekach po przejściu przez zakład oczyszczania odcieków (LTP) średnie stężenie mikroplastików było na poziomie 200 ± 12 cz./dm<sup>3</sup>. Dla porównania w próbkach kontrolnych pobranych z okolicznych wód powierzchniowych zaobserwowano drobinę tworzyw w ilości 2090 ± 100 cz./dm<sup>3</sup>, a w wodach gruntowych stężenie MP wynosiło 647 ± 22 cz./dm<sup>3</sup>. Pod wzglę-

dem morfologicznym w odciekach przeważały cząstki (53,8%) i włókna (26,3%) i dominowały drobinę o rozmiarze 0,1 – 0,5 mm (50,6%), głównie polietylenu i polipropylenu. Efektywność usuwania MP przez zakład oczyszczania odcieków (LTP) określono na poziomie 46%.

Badania nad obecnością drobin tworzyw sztucznych prowadzono również w Tajlandii (Rayong), gdzie wykazano, że w próbkach odcieków średnie stężenie MP wyniosło 139 cz./dm<sup>3</sup> i było wyższe, niż w wodach gruntowych, gdzie ilość mikroplastików wahała się od 18 do 94 cz./dm<sup>3</sup>. Analiza µ-FTIR wykazała, że w przypadku tych odcieków dominującymi formami mikroplastików były folie i cząstki polietylenu oraz polipropylenu (Wisitthammasri i in. 2024).

Z kolei Nurhasanah i in. (2021) prowadzili badania na miejskim składowisku odpadów Galuga, gdzie trafiają odpady z miasta Bogor (Indonezja). Składowisko to, podobnie jak Buszehr w Iranie, nie posiada warstwy izolującej odpadów od podłoża gruntowego, z wyjątkiem niewielkiego obszaru przy samym zbiorniku odciekowym. Pobrane próbki odcieków filtrowano przez sito stalowe o oczkach 5 mm, 200 µm i 20 µm, a zatrzymane na sitach frakcje suszono. Kolejnym etapem przygotowania materiału do analiz była separacja grawitacyjna z wykorzystaniem nasyconego roztworu NaCl. Następnie z próbek usunięto materię organiczną przy użyciu odczynnika Fentona (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + FeSO<sub>4</sub>). Pozyskane drobinę tworzyw analizowano metodą wizualną z wykorzystaniem mikroskopu optycznego, a ich skład chemiczny określano technikami spektrometrycznymi FTIR oraz µ-FTIR. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że stężenie mikroplastików w zbiorniku odciekowym wynosiło 57,04 ± 5,88 cz./m<sup>3</sup> a mezoplastików 163,70 ± 42,44 cz./m<sup>3</sup>. Według oszacowanych przez badaczy danych, dzienna ilość uwalnianych drobin tworzyw sztucznych do pobliskiej rzeki Cianten wynosi 80 640 ± 604,80 cz./d mikroplastików oraz 618 240 ± 1905,45 cz./d mezoplastików. Należy podkreślić, że odcieki ze zbiornika odciekowego są kierowane bezpośrednio do pobliskiej rzeki bez oczyszczania.

Odnosząc się do badań prowadzonych w Europie należy zwrócić szczególną uwagę na doświadczenia Praagh i Liebmann (2021), które dotyczyły identyfikacji mikroplastików w odciekach ze składowisk odpadów, pochodzących z Finlandii, Islandii i Norwegii. Analizie poddano odcieki pobrane z 11 składowisk, zróżnicowanych pod względem wieku składowiska

oraz stanu eksploatacji. Metody analityczne oparte były o mikrospektroskopię FTIR i ATR-FTIR. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu wykazano, że stężenie MP w odciekach zmieniało się od 0 do 4,51 cz./dm<sup>3</sup>. Zdaniem badaczy pomimo stwierdzonej obecności mikroplastików w odciekach, ich udział w globalnym zanieczyszczeniu środowiska jest ograniczony. W porównaniu do innych źródeł wtórnego zanieczyszczenia mikroplastikiem jego stężenia w odciekach są w krajach skandynawskich stosunkowo niskie. Wskazano jednak na potrzebę dalszych, bardziej szczegółowych badań, obejmujących mniejsze frakcje cząstek oraz konieczność wydłużenia okresu obserwacji. Ponadto podkreślono potrzebę standaryzacji metod pobierania próbek odcieków, jak również dopracowania istniejących technik analitycznych, wykorzystywanych w identyfikacji jakościowo-ilościowej mikroplastików.

Wniosek skandynawskich badaczy odnoszący się do niewielkiego udziału MP z odcieków w znaczeniu globalnym, wydaje się być kontrowersyjny. Takie stanowisko stoi w sprzeczności z danymi z innych regionów świata, gdzie świadomość ekologiczna ludności krajów rozwijających się nie jest tak wysoka, jak w krajach nordyckich. Dla porównania należy przytoczyć przykład składowisk Buszehr w Iranie oraz Galuga, w Indonezji, gdzie nie zastosowano podstawowego zabezpieczenia w postaci poziomych barier izolujących gromadzone odpady od gruntu macierzystego, a migrujące odcieki zanieczyszczają środowisko gruntowo-wodne, czy bezpośrednio dostają się do rzeki, jak w przypadku składowiska Galuga.

Porównanie stężeń mikroplastików w wybranych odciekach składowiskowych przedstawiono w tabeli 1.

W większości przytoczonych badań Autorzy podkreślają potrzebę dalszych badań oraz konieczność wdrożenia skutecznych działań prowadzących do ograniczenia migracji MP w środowisku, a tym samym ich negatywnego wpływu na organizmy żywe i całe ekosystemy. Z przeglądu literatury wypływa również konieczność ustandaryzowania metodyki oznaczania mikroplastików w poszczególnych elementach środowiska, gdyż stosowanie różnych metod analitycznych utrudnia porównywanie uzyskiwanych wyników.

## Wnioski

Mikroplastiki są globalnym problemem środowiskowym. Destabilizują ekosystemy

Tabela 1. Porównanie stężeń MPs w odciekach

Miejsce poboru odcieków	Stężenie	Metoda oczyszczania	Skuteczność oczyszczania	Metoda oznaczania	Źródło danych
Randegan, Mojokerto, Indonezja	śr. 9,0±0,85 cz./dm <sup>3</sup>	zakład oczyszczania odcieków (LTP)	75,6%	spektrometria FTIR	Trihadiningrum i in. (2023)
Hongkong, Chiny	49,0±24,3 - 507,6±37,3 cz./dm <sup>3</sup>	reaktory sekwencyjne (SBR)	-	wizualna, mikroskop stereoskopowy; spektrometria FTIR; mikroskopia skaningowa (SEM)	Qin i in. (2024)
Shanghai, Chiny	0,42 - 24,58 cz./dm <sup>3</sup>	-	-	spektrometria FTIR	He i in. (2019)
Buszehr, Iran	63 - 92 cz./dm <sup>3</sup> (śr. 79,16 cz./dm <sup>3</sup> )	-	-	wizualna, mikroskop stereoskopowy; spektroskopia Ramana; mikroskopia skaningowa (SEM)	Mohammadi i in. (2022)
Amin Bazar, Dhaka, Bangladesz	śr. 270±13 cz./dm <sup>3</sup> max. 370±16 cz./dm <sup>3</sup>	zakład oczyszczania odcieków (LTP)	46%	wizualna, mikroskop stereoskopowy; transformacja Fouriera w podczerwieni (FTIR); mikroskopia skaningowa (SEM)	Rahman i in. (2024)
Rayong, Tajlandia	śr. 139 cz./dm <sup>3</sup>	-	-	analiza μ-FTIR	Wisithammasri i in. (2024)
Galuga, Bogor, Indonezja	57,04 ± 5,88 cz./m <sup>3</sup>	-	-	mikroskop optyczny, spektrometr FTIR oraz μ-FTIR	Nurhasanah i in. (2021)
Finlandia, Islandia, Norwegia	0 - 4.51 cz./dm <sup>3</sup>	-	-	mikrospektroskopia FTIR, ATR-FTIR	Praagh i Liebmann (2021)

i stanowią potencjalne ryzyko dla zdrowia ludzi i innych organizmów żywych. Można je spotkać praktycznie we wszystkich komponentach środowiska, w tym w odciekach ze składowisk odpadów komunalnych. Stężenie MPs w odciekach uzależnione jest od wielu czynników, w tym od ilości i rodzaju składowanych odpadów, metod ich segregacji, intensywności odpadów atmosferycznych, a także wieku składowiska.

Mikroplastiki obecne w odciekach pochodzą głównie z fragmentacji większych kawałków tworzyw sztucznych, które nie zostały poddane recyklingowi i zostały zdeponowane na składowiskach wraz z innymi rodzajami odpadów. Niemniej porównując dane literaturowe można zaobserwować, że stężenie mikroplastików w odciekach jest niższe, niż w ściekach bytowo-gospodarczych. Drobinę polimerów najczęściej wykrywane w odciekach to polietylen (PE), polipropylen (PP) i polistyren (PS).

Większość badaczy zwraca uwagę na niedoskonałości stosowanych metod analitycznych oraz na brak standardowych metod oznaczania MPs w odciekach. Podkreślają przy tym, że

różne sposoby identyfikacji drobin tworzyw sztucznych często uniemożliwiają porównanie wyników innych eksperymentów naukowych.

#### LITERATURA:

- Nowak R., Włodarczyk-Makuła M., Treatment and Utilization of the Concentrate from Membrane Separation Processes of Landfill Leachates, CEER 2020, 30, 2, 92-104, DOI: 10.2478/ceer-2020-0022
- Nowak R., Ocena wpływu odcieków składowiskowych na przyrost wierzby energetycznej, Instal 2022, 12, 14-16, DOI: 10.36119/15.2022.12.2
- Singh S., Kalyanasundaram M., Diwan V., Removal of microplastics from wastewater: available techniques and way forward, Water Science and Technology 2021, 84(12), 3689-3704, doi.org/10.2166/wst.2021.472
- Cole M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., Microplastics as contaminants in the marine environment: A review, Marine Pollution Bulletin 2011, 62, 12, 2588-2597, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
- Wiśniowska E., Moraczewska-Majkut K., Nocoń W., Efficiency of microplastics removal in selected wastewater treatment plants - preliminary studies, Desalination and Water Treatment 2018, 134, 316-323, doi.org/10.5004/dwt.2018.2341
- Blackburn K., Green D., The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown, Ambio 2022, 51, 518-530, doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9
- Sazli D., Nassouhi D., Ergönül M.B., Atasagun S., A comprehensive review on microplastic pollution in aquatic ecosystems and their effects on aquatic biota, Aquatic Sciences and Engineering 2023, doi.org/10.26650/ASE20221186783
- Araujo C.F., Nolasco M.M., Ribeiro A.M.P., Ribeiro-Claro P.J.A., Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects, Water Research 2018, 142, 426-440, doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.060
- 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, doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056
- Rochman C.M., Browne M.A., Underwood A.J., van Franeker J.A., Thompson R.C., Amaral-Zettler L.A., The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived, Ecology 2016, 97, 2, 302-312, doi.org/10.1890/14-2070.1
- Jutrzenka Trzebiatowska P., Kadac-Czapska K., Grembecka M., Mikroplastik - źródła, techniki separacji i identyfikacji, Wiadomości Chemiczne 2023, 77, 153-178, DOI: 10.53584/wiadchem.2023.03.2
- Suaria G., Avio C.G., Mineo A., Lattin G.L., Magaldi M.G., Belmonte G., Moore Ch.J., Regoli F., Aliani S., The Mediterranean Plastic Soup: synthetic polymers in Mediterranean surface waters, Scientific Reports 2016, 37551, 6, 1, doi.org/10.1038/srep37551
- Trihadiningrum Y., Wilijeng S.A., Tafaquy R., Radita D.R., Radityaningrum A.D., Evidence of microplastics in leachate of Randegan landfill, Mojokerto City, Indonesia, and its potential to pollute surface water, Science of The Total Environment 2023, 874, 162207, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162207
- Qin Z.H., Siddiqui M.A., Xin X., Mou J.H., Varjani S., Chen G., Lin C.S.K., Identification of microplastics in raw and treated municipal solid waste landfill leachates in Hong Kong, China, Chemosphere 2024, 351, 141208, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141208
- He P., Chen L., Shao L., Zhang H., Lü F., Municipal solid waste (MSW) landfill: A source of microplastics? - Evidence of microplastics in landfill leachate, Water Research 2019, 159, 38-45, doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.060
- Praagh, M. V., Hartman, C., Brandmyr, E., Microplastics in landfill leachates in the nordic countries, 2018, diva-portal.org/smash/get/diva2:1277395/FULLTEXT01.pdf (20.05.2025)
- Mohammadi A., Malakootian M., Dobaradaran S., Hashemi M., Jaafarzadeh N., Occurrence, seasonal distribution, and ecological risk assessment of microplastics and phthalate esters in leachates of a landfill site located near the marine environment: Bushehr port, Iran as a case, Science of The Total Environment 2022, 842, 156838, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156838
- Rahman M.A., Haque M.M., Tareq S.M., Abundance and characteristics of microplastics in the landfill leachate of Amin Bazar, Dhaka: A potential risk to aquatic environments, Physics and Chemistry of the Earth 2024, Parts A/B/C, 134, 103573, doi.org/10.1016/j.pce.2024.103573
- Wisithammasri W., Promduang P., Chotpanarat S., Characterization of microplastics in soil, leachate and groundwater at a municipal landfill in Rayong Province, Thailand, Journal of Contaminant Hydrology 2024, 267, 104455, doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104455
- Nurhasanah, Cordova M.R., Riani E., Micro- and mesoplastics release from the Indonesian municipal solid waste landfill leachate to the aquatic environment: Case study in Galuga Landfill Area, Indonesia, Marine Pollution Bulletin 2021, 163, 111986, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111986
- Praagh M. van, Liebmann B., Microplastics in landfill leachates in three Nordic countries, Detritus 2021, 17, 58-70, 10.31025/2611-4135/2021.15149

**Pracę wykonano w ramach subwencji statutowej Politechniki Częstochowskiej Wydziału Infrastruktury i Środowiska**