

Anna Miązek , Karina Krzciuk 

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, ul. Uniwersytecka 7, 25 – 406 Kielce

Instytut Chemii

e-mail: a.miazek41@gmail.com

PORÓWNANIE METOD MINERALIZACJI MIKROPLASTIKU NA PRZYKŁADZIE BROKATU

COMPARISON OF MICROPLASTIC MINERALIZATION METHODS

ON THE EXAMPLE OF GLITTERES

ABSTRACT

The subject of microplastics is one of the most popular topic among different disciplines, like: chemistry, biotechnology or environmental protection. The growing interest in this new problem cause the need to develop modern analytical methods. Plastics are made of synthetic polymers and are used in every area of life. Plastics can fragment into microplastics and nanoparticles. The example of primary microplastics are glitters used in cosmetics. The glitter often is built with several layers, including colourful layers of pigments and the aluminium “mirror”. Therefore, polymer glitters may pose a threat not only due to its size and shape, but also due to the possibility of delivery potentially toxic metals. The aim of this research was to compare two methods (A and B) of microplastic mineralization in the form of glitter based on the analysis of selected elements: Ni, Mn, Cu, Al. The mineralization was carried out in a closed system assisted by microwave radiation, and the compared methods differed in the reaction mixture (A: HNO_3 and HCl , B: HNO_3 , HCl and H_2O_2). The obtained data suggest that more effective method was A (without the addition of H_2O_2).

KEY WORDS: microplastics, glitter, mineralization, potentially toxic elements.

STRESZCZENIE

Mikroplastik to jeden z najbardziej popularnych tematów wśród naukowców różnych dyscyplin, jak chemia, biotechnologia czy ochrona środowiska, jednak wraz ze wzrostem zainteresowania tym problemem, wzrosła również konieczność opracowania nowych metod analitycznych. Plastik zbudowany jest z syntetycznych polimerów i wykorzystywany w każdej dziedzinie życia. Plasterki mogą ulec fragmentacji tworząc dalej mikroplastiki i nanoplastiki. Jednym z przykładów mikroplastików pierwotnych są używane w kosmetyce brokaty. Drobiną brokatu najczęściej zbudowana jest z kilku warstw, w tym barwnych warstw pigmentów oraz tzw. „lustra” glinowego. A zatem polimerowy brokat może stanowić zagrożenie nie tylko ze względu na swój rozmiar, kształt, ale też ze względu na możliwość uwalniania potencjalnie toksycznych metali. Celem przeprowadzonych badań było porównanie dwóch metod (A i B) mineralizacji mikroplastiku w postaci brokatu na podstawie analizy wybranych pierwiastków: Ni, Mn, Cu, Al. Mineralizacja odbywała się w układzie zamkniętym wspomaganym promieniowaniem mikrofalowym, a porównywane metody różniły się składem mieszaniny reakcyjnej (A: HNO_3 i HCl , B: HNO_3 , HCl i H_2O_2). Analizując otrzymane dane lepszą skutecznością wykazała się metoda A, czyli ta bez dodatku H_2O_2 .

SŁOWA KLUCZOWE: mikroplastik, brokat, mineralizacja, potencjalnie toksyczne pierwiastki.

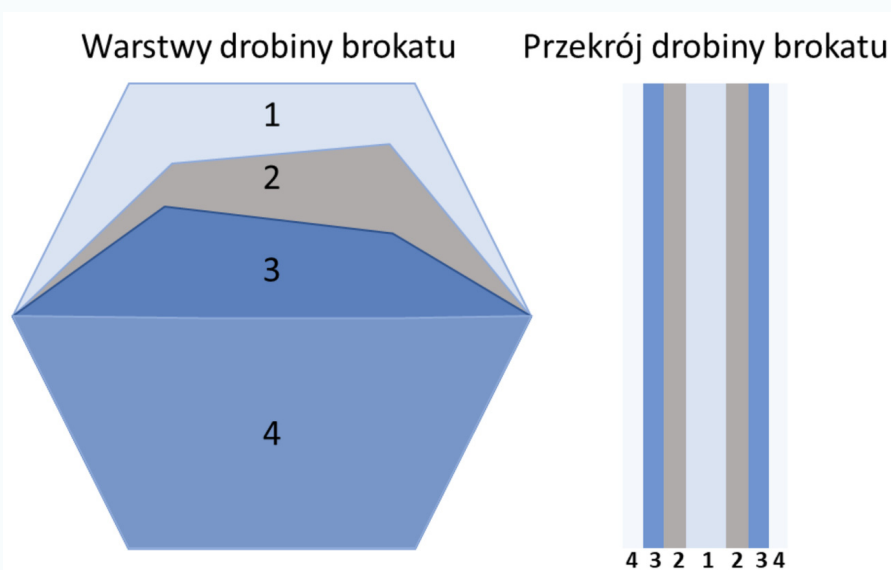
WSTĘP

Tworzywa sztuczne i ich obieg to obecnie jeden z najpopularniejszych tematów, nie tylko wśród naukowców (Wang, 2023). Dynamiczny wzrost zużycia polimerów (Janaswamy et al., 2022; Li et al., 2023) prowadzi do wszechobecności plastiku i powszechnego zanieczyszczenia nim różnych elementów środowiska (w tym: mórz, oceanów, środowiska lądowego, powietrza i innych) (Yang et al., 2021). Jak na tę chwilę zanieczyszczenie to jest trwałe (Geyer et al., 2017), więc jednym z wyzwań współczesności jest znalezienie narzędzi możliwych do wykorzystania do oczyszczania środowiska w globalnym wymiarze. Aby tego dokonać istotne jest poznanie metod badawczych i kontroli jakości prowadzonych badań nad plastikiem i jego produktami przemian (Möller et al., 2020).

MIKROPLASTIK I KONTROLA JAKOŚCI BADAŃ

Mikroplastik to drobne cząstki plastiku o wielkości mniejszej niż 5 mm (Frias and Nash, 2019). Powstaje on w różny sposób, m.in. z rozpadu większych przedmiotów z tworzyw sztucznych, w wyniku procesów mechanicznych i chemicznych, a także pochodzi z kosmetyków i środków czyszczących, które zawierają mikroplastik np. w postaci brokatu, kuleczek, ziarenek (Cole et al., 2011). Jest on wszechobecny, występuje w: wodzie pitnej, powietrzu, glebie, żywności, jak również w organizmach żywych, u ludzi. Ma to szereg negatywnych skutków dla środowiska i zdrowia, m.in. wpływa na zmiany klimatu, niszczy ekosystemy, wpływa na zdrowie ludzi poprzez działanie toksyczne i kancerogenne (Li et al., 2023). Tworzywa sztuczne, też mikroplastiki, różnią się składem chemicznym, formą fizyczną, rozmiarem, teksturą, kształtem (Qiu et al., 2023). Cechy te ewoluują podczas użytkowania i po wyrzuceniu odpadów polimerowych. Mikroplastiki mogą adsorbować trwałe zanieczyszczenia organiczne i nieorganiczne obecne w środowisku naturalnym, ale i same mogą być źródłem zanieczyszczeń, np. potencjalnie toksycznych metali (popularnie nazywanych metalami ciężkimi), czy też uwalnianych plastyfikatorów (Law and Thompson, 2014; Vedolin et al., 2018). Badania nad mikroplastikiem są więc istotne, aby zrozumieć jego wpływ na środowisko i zdrowie ludzi oraz opracować strategię ochrony przed jego negatywnym działaniem.

Jednym ze źródeł mikroplastiku w środowisku są kosmetyki, a w tym produkty zawierające brokat. Wykorzystywany jest on w celach ozdobnych, często niewymieniany w składnikach kosmetyku. Mikroplastik produkowany w postaci brokatu składa się z kilku nieobligatoryjnych warstw (zwykle od 1 do 4), gdzie warstwą bazową najczęściej jest trwały polimer (1), a dalej tzw. lustro aluminiowe (2), warstwy kolorowych pigmentów (3), powłoka ochronna (np. polimerowa folia) (4) (Ryc.1). Pigmenty i warstwa lustrzana mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzkiego i środowiska, ze względu na uwalnianie potencjalnie toksyczne pierwiastki, stąd zasadne jest podjęcie działań monitorujących.



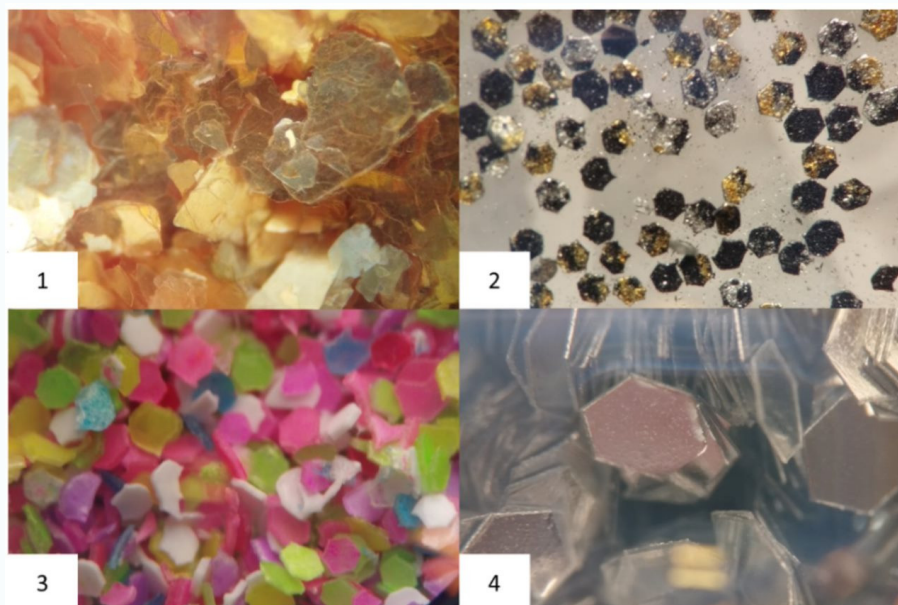
RYCINA 1. Warstwy drobiny brokatu oraz jej schematyczny przekrój, 1 – warstwa polimeru, 2 – glinowa warstwa lustrzana, 3 – warstwa kolorowego pigmentu, 4 – warstwa przezroczystego polimeru

Analiza pierwiastkowa próbek stałych, w tym polimerów w postaci brokatów, wymaga odpowiedniego ich przygotowania, które składa się z kilku etapów (Konieczka and Namieśnik, 2018). Każdy z nich powinien być poddany kontroli jakości. Najprostszym rozwiązaniem w kontroli jakości wyników analiz pierwiastkowych, na każdym etapie przygotowania i analizy próbki, jest stosowanie matrycowych certyfikowanych materiałów odniesienia (Konieczka and Namieśnik, 2018). Niestety, ze względu na to, że tematyka badań jest nowa – nie istnieją dostępne na rynku odpowiednie materiały porównawcze, opatrzone stosownymi certyfikatami. Dlatego przygotowując próbkę do analizy należy zwrócić szczególną uwagę na dobór metodyk jej przygotowania i wybrać tę, która daje najbardziej wiarygodne rezultaty.

Pierwszym krokiem w etapie przygotowania próbek jest ich rozdrobnienie i homogenizacja. Następnym etapem jest mineralizacja, czyli „trawienie” próbki za pomocą odpowiednich reagentów, w celu rozpuszczenia w niej związków chemicznych i uwolnienia wszystkich oznaczanych pierwiastków do roztworu (Ślęzak et al., 2016). Proces ten jest kluczowy w analizie pierwiastkowej dla większości technik analitycznych (Kubrakova and Toropchenova, 2013), ponieważ umożliwia oznaczenie analitów, które nie byłyby dostępne w inny sposób, np. ze względu na swoją nierozpuszczalność. Mineralizacja jest szczególnie istotna w przypadku próbek zawierających metale, w tym tzw. metale ciężkie lub pierwiastki śladowe, ponieważ te składniki zwykle występują w niskich stężeniach i są trudne do oznaczenia. W rezultacie mineralizacja próbek stałych jest niezbędnym etapem przygotowania próbek do analizy pierwiastkowej, umożliwia oznaczenie pierwiastków, które są kluczowe w określeniu składu chemicznego próbki. Ze względu na brak odpowiednich certyfikowanych materiałów odniesienia i konieczność zapewnienia kontroli jakości wyników analitycznych, konieczne jest przeprowadzenie badań pilotażowych, które wskażą metodę o lepszym potencjale. Mineralizacja w układzie zamkniętym wspomagana promieniowaniem mikrofalowym, to hybrydowy układ, z powodzeniem wykorzystujący zasoby technik, takich jak: mineralizacja kwasowa, mineralizacja w układzie zamkniętym (tzw. bomba teflonowa) oraz wspomaganie promieniowaniem mikrofalowym (Chattopadhyay et al., 2004; Gaudino et al., 2007). Poprzez połączenie tych metod mineralizacja wspomagana promieniowaniem mikrofalowym jest niezwykle skuteczna, wymaga mniejszego zużycia reagentów, energii czy czasu. Określana jest mianem „zielonej” (Ślęzak et al., 2016).

METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było porównanie dwóch metod mineralizacji mikroplastiku w postaci brokatu (używanych w celach kosmetycznych, dostępnych na rynku polskim) na podstawie analizy wybranych i potencjalnie toksycznych pierwiastków: Ni, Mn, Cu, Al. Do badań wykorzystano 4 próbki brokatu o różnych kolorach (rycina 2). Drobiną brokatu zawiera kilka warstw, w tym warstwę polimeru, tzw. warstwa lustrzana – składająca się głównie z glinu, czy warstwy kolorowych pigmentów, które zwykle – w zależności od koloru, bogate są w pierwiastki tworzące barwne związki lub są metaliczne, stąd też wybór takich metali.



RYCINA 2. Badane drobinę brokatu (1-4) – zdjęcia mikroskopowe, powiększenie 5-krotne.

Mineralizacja odbywała się z wykorzystaniem mineralizatora Multiwave 3000, Anton Paar, w układzie zamkniętym, wspomagana promieniowaniem mikrofalowym. Analizy wykonano z wykorzystaniem spektrometru absorpcji atomowej (AAS) z atomizacją płomieniową (iCE 3500Z Thermo Scientific).

Porównywane metody różniły się zastosowaniem reagentów do mineralizacji: przy pierwszej metodzie (A) do kolejnych naważek ($0,1000 \text{ g} \pm 0,0020 \text{ g}$) brokatu (próbki 1-4) dodawano odpowiednie ilości HNO_3 i HCl oraz przy drugiej metodzie (B) do kolejnych naważek ($0,1000 \text{ g} \pm 0,0020 \text{ g}$) brokatu (próbki 1-4) dodawano odpowiednie ilości HNO_3 , HCl i H_2O_2 . Szczegółowy dobór parametrów został przedstawiony w tabeli 1.

TABELA 1. Parametry zastosowane w mineralizacji dla metod A i B.

Parametr	Metoda A	Metoda B
Masa próbki	$0,1000 \text{ g} \pm 0,0020 \text{ g}$	
Mieszanina reakcyjna		
HNO_3 stęż.	6 ml	
HCl stęż.	0,5 ml	
H_2O_2 30%	BRAK	1 ml
Parametry mineralizatora		
Temperatura	220°C	
Ciśnienie	60 bar	
Narost ciśnienia	0,3 bara/s	

WYNIKI BADAŃ

Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 2.

Fizyczna ocena mineralizatów przebiegła pozytywnie, wszystkie otrzymane roztwory (zarówno metoda A i B) charakteryzowały się klarownością, były przezroczyste, nie zaobserwowano pozostałości po polimerach, które to uległy całkowitemu rozтворzeniu. Całkowita ilość pierwiastków przeszła z matrycy do roztworu, a zatem rozważane będą całkowite ilości dostępnych pierwiastków. Wyniki przeliczono na miligramy na kilogram brokatu [mg/kg].

Ilość otrzymanych danych powyżej granicy oznaczalności dla wszystkich pierwiastków mineralizowanych metodą A wynosiła 10, a metodą B – 9. Porównując sumy dla wszystkich pierwiastków, większą odznaczała się metoda (A) ($\sum_{\text{Ni, Mn, Cu, Al}} 85052 \text{ mg/kg}$) w porównaniu do metody (B) ($\sum_{\text{Ni, Mn, Cu, Al}} 73530 \text{ mg/kg}$). Pierwsza metoda skuteczniej mineralizowała próbki do oznaczeń Ni, ponieważ w dwóch próbkach została oznaczona ilość 7,50 mg/kg (próbka 1A) oraz 7,25 (próbka 3A), próbki 2 i 4 poniżej granicy oznaczalności, natomiast druga metoda (B) – wszystkie wyniki dla Ni poniżej granicy oznaczalności. Do oznaczania manganu lepsza okazała się metoda (B), ponieważ tylko jedna próbka (2B) znajdowała się poniżej granicy oznaczalności, natomiast w metodzie (A) – aż dwie (próbki 2A i 4A). Dla miedzi wyniki oznaczeń dla metody (A) i (B) były bardzo podobne – dwie próbki poniżej granicy oznaczalności w obydwóch przypadkach (próbki 1 A, B i 4 A, B). Jednak suma Cu dla metody A ($\sum_{2A,3A}$ dla Cu 66,9 mg/kg) była nieznacznie wyższa, niż dla metody B ($\sum_{2B,3B}$ dla Cu 65,4 mg/kg). Najwięcej w badanych brokatakach oznaczono glinu, w każdej

TABELA 2. Wyniki oznaczeń pierwiastków dla dwóch metod mineralizacji A i B.

Próbka	Ni mg/kg	Mn mg/kg	Cu mg/kg	Al mg/kg
Mineralizacja (A): HNO₃ + HCl				
1A	7,50	32,0	p.g.o.	69856
2A	p.g.o.	p.g.o.	55,4	12320
3A	7,25	8,25	11,5	236
4A	p.g.o.	p.g.o.	p.g.o.	2519
Mineralizacja (B): HNO₃ + HCl + H₂O₂				
1B	p.g.o.	31,3	p.g.o.	60082
2B	p.g.o.	p.g.o.	54,1	10966
3B	p.g.o.	8,25	11,3	178
4B	p.g.o.	2,88	p.g.o.	2197

gdzie: p.g.o. – poniżej granicy oznaczalności

TABELA 3. Podsumowanie otrzymanych wyników analiz.

Własność	Metoda A	Metoda B	Bez wskazania
Ilość wyników dla wszystkich pierwiastków	+		
Suma dla wszystkich pierwiastków	+		
Oznaczanie Ni	+		
Oznaczanie Mn		+	
Oznaczanie Cu			+
Oznaczanie Al	+		
Istotność statystyczna dla ilości oznaczanego Al*			+
Istotność statystyczna dla ilości oznaczanych Ni, Mn, Cu, Al*			+
Suma	4	1	2

*test U Manna-Whitneya dla grup niezależnych

z badanych próbek i metod (A) i (B) – powyżej granicy oznaczalności. Największą ilością glinu charakteryzowała się próbka 1: 69856 mg/kg – metoda mineralizacji (A) oraz 60082 mg/kg – metoda mineralizacji (B). Najmniej Al zaobserwowano dla próbki (metoda mineralizacji A i B) 3, gdzie nie zaobserwowano lustrzanej powłoki, a drobiny zbudowane były z jednej warstwy – kolorowego polimeru. Suma Al dla wszystkich próbek w metodzie A ($\sum_{1A,2A,3A,4A}$ 84931 mg/kg) była wyższa o ponad 13%, niż dla metody B ($\sum_{1B,2B,3B,4B}$ 73423 mg/kg).

Jedynym pierwiastkiem, który został oznaczony w obydwu grupach A i B i w każdej próbce brokatu był glin. Aby zbadać, czy różnice pomiędzy tymi dwiema grupami (ich średnimi) są istotne statystycznie zastosowano testy statystyczne oraz program STATISTICA StatSoft®. Ponieważ test Shapiro-Wilka (test służący do oceny, czy analizowane dane posiadają rozkład normalny) wykazał, że oznaczenia dla glinu, zarówno dla grupy A, jak i B posiadają prawdopodobieństwa testowe p poniżej założonej wartości istotności statystycznej $\alpha=0,05$ ($p_A=0,0046<\alpha$, $p_B=0,0489<\alpha$), stwierdzono, więc że badane dane nie charakteryzują się rozkładem normalnym. Aby zbadać statystyczną istotność różnic średnich rang dla badanych grup A i B zastosowano zatem nieparametryczny test U Manna-Whitneya dla grup niezależnych, który jest alternatywą dla parametrycznego testu t-Studenta dla grup niezależnych (choć testy parametryczne charakteryzują się większą mocą, to wymogiem jest tu normalny rozkład danych). W tym przypadku prawdopodobieństwo testowe p było większe od założonej wartości istotności statystycznej ($p=0,6650>\alpha=0,05$), a zatem metoda mineralizacji nie wpłynęła istotnie statystycznie na zawartość Al w badanych próbkach (Kościelniak, 2022). Podobne obliczenia wykonano dla wszystkich wyników (dla wszystkich pierwiastków) – porównując grupy A i B, które po teście Shapiro-Wilka też charakteryzowały się brakiem rozkładu normalnego. Zastosowano i tu test nieparametryczny U Manna-Whitneya. W teście tym $p=0,8702>\alpha=0,05$, co również wskazuje, że porównywane metody A i B mineralizacji nie wpłynęły istotnie statystycznie na zawartość analizowanych pierwiastków we wszystkich badanych próbkach (Kościelniak, 2022).

Analizując otrzymane dane (tab. 3): każda z metod, A i B, cechowała się pewnymi wadami i zaletami, a badania statystyczne nie wskazały jednoznacznie na którąś z nich. Jednak badając kolejne czynniki – największą skutecznością wykazała się metoda A, czyli ta bez dodatku H_2O_2 .

PODSUMOWANIE

Dbanie o jakość wyników na każdym etapie badania próbek jest obligatoryjne do uzyskania wiarygodnych danych (Shim et al., 2017). Porównywane metody dobrze roztworzyły badane brokaty, natomiast metoda pierwsza (A) daje lepszy odzysk analizowanych pierwiastków (lepszą skuteczność mineralizacji), z wyjątkiem dla Mn. Badane próbki przeznaczone są do kontaktu ze skórą, a dalej mogą trafiać do różnych elementów środowiska przyrodniczego. Aktualnie nie są dostępne badania na temat biodostępności pierwiastków z warstw brokatu, jednak warstwy te jest niezwykle łatwo porysować lub mechanicznie oddzielić od polimeru bazowego. Zatem w odpowiednich warunkach w stosunkowo prosty sposób ulegają uruchomieniu i dalszemu transportowi. Dlatego prezentowane w pracy dane nie mają jedynie wymiaru analitycznego, ale też praktyczny – istnieje konieczność zbadania i monitorowania pierwiastków uwalnianych z mikroplastików. W każdej ze zbadanych próbek obecny był glin (nawet w ilości 6% wagowych), który jest toksyczny dla człowieka, gdyż może prowadzić, na przykład, do dezaktywacji części enzymów, działa szkodliwie na skórę i na układ nerwowy (Exley, 2016). Natomiast nikiel może prowadzić do silnych alergii, na skórze często wywołuje wysypki, jest również rakotwórczy (Das et al., 2013). Miedź w kontakcie ze skórą często wywołuje swędzenie i stany zapalne (Gaetke and Chow, 2003). Mangan w nadmiarze prowadzi do uszkodzeń w układzie nerwowym (Crossgrove and Zheng, 2004). Praca ta może stanowić wstęp do dalszych badań, które będą rozwijać tematykę biodostępności i toksykologii metali uwalnianych z plastików i szacować związane z tym zagrożenie dla człowieka i środowiska.

LITERATURA

- Chattopadhyay P. et al. (2004) 'Matrix digestion of soil and sediment samples for extraction of lead, cadmium and antimony and their direct determination by inductively coupled plasma-mass spectrometry and atomic emission spectrometry', *Microchimica Acta*, Vol. 144, No. 4, pp. 277–283. doi: /10.1007/s00604-003-0113-2.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S. (2011) 'Microplastics as contaminants in the marine environment: a review', *Marine Pollution Bulletin* 62, pp. 2588–2597. doi: /10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- Crossgrove J. and Zheng W. (2004) 'Manganese toxicity upon overexposure', *NMR Biomed*, 17, pp. 544 - 553. doi: 10.1002/nbm.931.
- Das, Kusal K. et al. (2019) 'Primary concept of nickel toxicity – an overview', *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, vol. 30, no. 2, pp. 141-152. doi: /10.1515/jbcpp-2017-0171.
- Exley C. (2016) 'The toxicity of aluminium in humans', *Morphologie*, Volume 100, Issue 329, 2016, pp. 51-55. doi: /10.1016/j.morpho.2015.12.003.
- Frias J.P.G.L. and Nash R. (2019) 'Microplastics: finding a consensus on the definition' *Mar. Pollut. Bull.* 138, pp. 145-147. doi: /10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
- Gaudino S., et al. (2007) 'The role of different soil sample digestion methods on trace elements analysis: a comparison of ICP-MS and INAA measurement results', *Accreditation and Quality Assurance*, Vol. 12, No. 2, pp. 84–93. doi: /10.1007/s00769-006-0238-1.
- Gaetke Lisa, M. and Chow Ching, Kuang (2003) 'Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients', *Toxicology*, Volume 189, Issues 1–2, pp. 147-163. doi: /10.1016/S0300-483X(03)00159-8.
- Geyer R., et al. (2017) 'Production, use, and fate of all plastics ever made', *Science Advances* 3(7). doi: /10.1126/sciadv.1700782.
- Janaswamy S., et al. (2022) 'Cellulosic fraction from agricultural biomass as a viable alternative for plastics and plastic products *Industrial Crops and Products*', pp. 179. doi: /10.1016/j.indcrop.2022.114692.
- Konieczka P. and Namieśnik J. (2018) 'Quality assurance and quality control in the analytical chemical laboratory: a practical approach'. New York, CRC Press. doi: /10.1201/9781315295015.
- Kościelniak P. (2022) 'Statystyka I i II', *Doskonały Uniwersytet*, Kraków.
- Kubrakova I.V. and Toropchenova E.S. (2013) 'Microwave sample preparation for geochemical and ecological studies', *Journal of Analytical Chemistry*, 68, pp. 467 – 476. doi: /10.1134/S1061934813060099.
- Law K.L. and Thompson R.C. (2014) 'Microplastics in the seas', *Science*, 345, pp. 144–145.
- Li Z., et al. (2023) 'A discussion of microplastics in soil and risks for ecosystems and food chains', *Chemosphere*, 313. doi: /10.1016/j.chemosphere.2022.137637.
- Möller J.N., et al. (2020) 'Finding microplastics in soils: a review of analytical methods', *Environ. Sci. Technol.* 54, pp. 2078–2090. doi: /10.1021/acs.est.9b04618.
- Qiu Y., et al. (2022) 'Soil microplastic characteristics and the effects on soil properties and biota: A systematic review and meta-analysis', *Environmental Pollution*, 313. doi: /10.1016/j.envpol.2022.120183.

Shim W.J., et al. (2017) 'Identification methods in microplastic analysis: a review', *Anal. Methods*. 9 (9), pp. 1384–1391. doi: /10.1039/C6AY02558G.

Ślęzak, et al. (2016) 'Mineralizacja mikrofalowa jako efektywna metoda roztwarzania stałych próbek środowiskowych', *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, 26, pp. 151 – 159.

Vedolin M.C., et al. (2018) 'Spatial variability in the concentrations of metals in beached microplastics', *Marine Pollution Bulletin* 129, pp. 487–493. doi: /10.1016/j.marpolbul.2017.10.019.

Wang S. (2023) - International law-making process of combating plastic pollution: Status Quo, debates and prospects, *Marine Policy*, 147. doi: /10.1016/j.marpol.2022.105376.

Yang L., et al. (2021) 'Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources', *Science of The Total Environment*, 754. doi: /10.1016/j.scitotenv.2020.141948.

§ Praca wpłynęła do redakcji: 05.07.2023r.

Zrecenzowano: 21.07.2023r.

Przyjęto do druku: 29.07.2023r.