

Zdzisław ADAMCZYK¹, Andrzej HARAT², Andrzej JAGUŚ³, Andrzej PORSZKE⁴

¹ Silesian University of Technology, Department of Applied Geology, Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Poland

² University of Bielsko-Biala, Department of Civil Engineering, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

³ University of Bielsko-Biala, Department of Environmental Protection and Engineering, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

⁴ AP Geotechnika, Kukulek 8, 43-215 Studzienice, Poland

ORCID / e-mail:

¹ 0000-0002-5925-4676 / zdzislaw.adamczyk@polsl.pl

² 0000-0003-3846-4495 / aharat@ath.bielsko.pl

Środowiskowe aspekty wmywania składników mineralnych z popiołów lotnych i żużli elektrowni

Słowa kluczowe:

odpady paleniskowe, popiół lotny, żużel, test wymywalności, migracja substancji chemicznych

Environmental aspects of the leaching of mineral components from power plant's fly ashes and slags

Keywords:

combustion waste, fly ash, slag, leachability test, migration of chemical substances

Abstract

Leachability of chemical substances from waste produced during fuel combustion in a power plant has been investigated. The aim of the research was to identify the chemical composition of eluates obtained from fly ashes and slags subjected to the leaching test. The results of leaching tests indicate potential environmental hazards related to the migration of chemical substances. Migration can occur both during the storage of waste and due to the weathering of usable materials, including those made from waste.

Leachability of the following substances has been analysed: sodium, potassium, chlorides, sulphates, arsenic, zinc, cadmium, copper, lead, nickel and chromium. The analysis of the results has demonstrated, above all, that fly ash eluates contain much more substances than slag eluates. This is particularly evident in the case of chlorides and sulphates, as well as nickel, which practically was not found in slag eluates.

The leached substances included among others zinc, lead, chromium, which are potentially toxic to living organisms. It should be noted, however, that the contents of these substances in the eluates did not exceed the permissible concentrations in industrial wastewater discharged into the environment. Exceedances occurred only in the case of sulphates contained in ash eluates. The concentrations of a given substance in the tested eluates were found to be different during the entire research period. These differences, especially in fly ash eluates, reached several dozen and even more than one hundred percent. This shows that the use of power plant waste in civil or water engineering should be preceded by an analysis of potential environmental impact.

1. WSTĘP

Produkcja energii elektrycznej, będąca efektem spalania paliw w zakładach energetycznych, wiąże się z powstawaniem ubocznych produktów spalania (UPS), zwanych też odpadami elektrownianymi. Wśród nich można wymienić: żużle, mieszanki popiołowo-żużlowe, popioły lotne, popioły lotne fluidalne, popioły denne, popioły denne fluidalne, gips syntetyczny (produkt poreakcyjny z odsiarczania spalin). Odpady te są w mniejszym lub większym stopniu zagospodarowane, zwłaszcza w budownictwie oraz rekultywacji terenów zdegradowanych [Borowski 2010, Rzepecki 2011]. Niestety część z nich jest składowana na składowiskach, co może stanowić zagrożenie dla środowiska gruntowo-wodnego [Golimowski i Koda 2007, Rosik-Dulewska i Karwaczyńska 2008].

Niniejsza praca przedstawia badania popiołów lotnych i żużli. Popioły lotne to mineralna pozostałość procesu spalania węgla, która wraz z gazami odlotowymi opuszcza palenisko. Wychwytywanie tego typu cząstek odbywa się najczęściej z zastosowaniem elektrofiltrów. Popioły lotne można podzielić, biorąc pod uwagę konstrukcję paleniska oraz rodzaj paliwa zastosowanego w kotłach energetycznych. W pierwszym przypadku wyróżnić można popioły wytwarzane w kotłach konwencjonalnych oraz fluidalnych. Przyjęcie jako podstawy podziału rodzaju zastosowanego paliwa pozwala na wyróżnienie popiołów powstających w rezultacie spalania węgla kamiennego, węgla brunatnego, a także współspalania odpowiednio węgla kamiennego i biomasy oraz węgla brunatnego i biomasy. Żużel z kolei stanowi masę szklanego spieczonego popiołu. Materiał ten opada grawitacyjnie z komory paleniskowej, a następnie odprowadzany jest hydraulicznie z zastosowaniem tzw. układu odżużlenia do komór osadczyczych. Ilość powstających popiołów i żużli zależy od [Olszewski i in. 2012]:

- masy zużytego węgla,
- jakości węgla,
- rodzaju i konstrukcji paleniska,
- skuteczności zastosowanych urządzeń odpylających.

Odpady elektrowniane stanowią przedmiot rozwiązań prawnych. W szerokim znaczeniu można do nich zaliczyć źródła prawa powszechnie obowiązującego, jak również uregulowania zamieszczone w Polskich Normach. Zastosowanie tych ostatnich nie ma rzecz jasna charakteru obowiązkowego, co jednoznacznie wynika z przepisu zamieszczonego w art. 5 ust. 3 ustawy z dnia 12 września 2002 r. o normalizacji [Dz.U. 2002 Nr 169, poz. 1386], w którym *expressis verbis* podkreślono, iż stosowanie Polskich Norm jest dobrowolne.

Jako odpady – pyły i żużle podlegają w całej rozciągłości przepisom ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [Dz.U. 2013, poz. 21] oraz wydanemu na podstawie tej ustawy rozporządzeniu w sprawie katalogu odpadów [Dz.U. 2020, poz. 10]. Wskazany akt wykonawczy wyróżnia łącznie 20 grup odpadów, przyjmując jako kryterium różnicujące źródło ich powstania. Wybrane grupy odpadów elektrownianych, będące przedmiotem rozważań podjętych w niniejszej pracy, zaliczyć należy do grupy 10 – odpady z procesów termicznych, a ściślej 10 01 – odpady z elektrowni i innych zakładów energetycznego spalania paliw. W ramach wskazanej grupy wyróżnia się, zgodnie z załącznikiem do omawianego aktu wykonawczego, rodzaje odpadów oznaczone następującymi kodami:

- 10 01 01 – żużle, popioły paleniskowe i pyły z kotłów,
- 10 01 02 – popioły lotne z węgla,
- 10 01 16* – popioły lotne ze współspalania zawierające substancje niebezpieczne,
- 10 01 17 – popioły lotne ze współspalania inne niż wymienione w 10 01 16,
- 10 01 82 – mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (metody suche i półsuche odsiarczania spalin oraz spalania w złożu fluidalnym).

Za uzupełnienie regulacji legislacyjnych uznać można regulacje zamieszczone w Polskich Normach, w tym w szczególności PN-EN 450-1:2012 oraz PN-EN 197-1:2012. Pierwsza z wymienionych norm definiuje popiół lotny jako drobno uziarniony pył, składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymywany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału składników współzapaalnych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim SiO_2 i Al_2O_3 , przy czym zawartość reaktywnego SiO_2 wynosi co najmniej 25% masy. Z kolei norma PN-EN 197-1:2012 za popiół lotny uznaje substancję otrzymywaną przez elektrostatyczne lub mechaniczne osadzanie pylistych cząstek spalin z palenisk opalanych pyłem węglowym. Ponadto omawiana norma dodatkowo różnicuje popiół lotny na krzemionkowy i wapienny, z których pierwszy posiada właściwości pucolanowe, a drugi może ponadto wykazywać właściwości hydrauliczne.

2. CEL I METODY BADAŃ

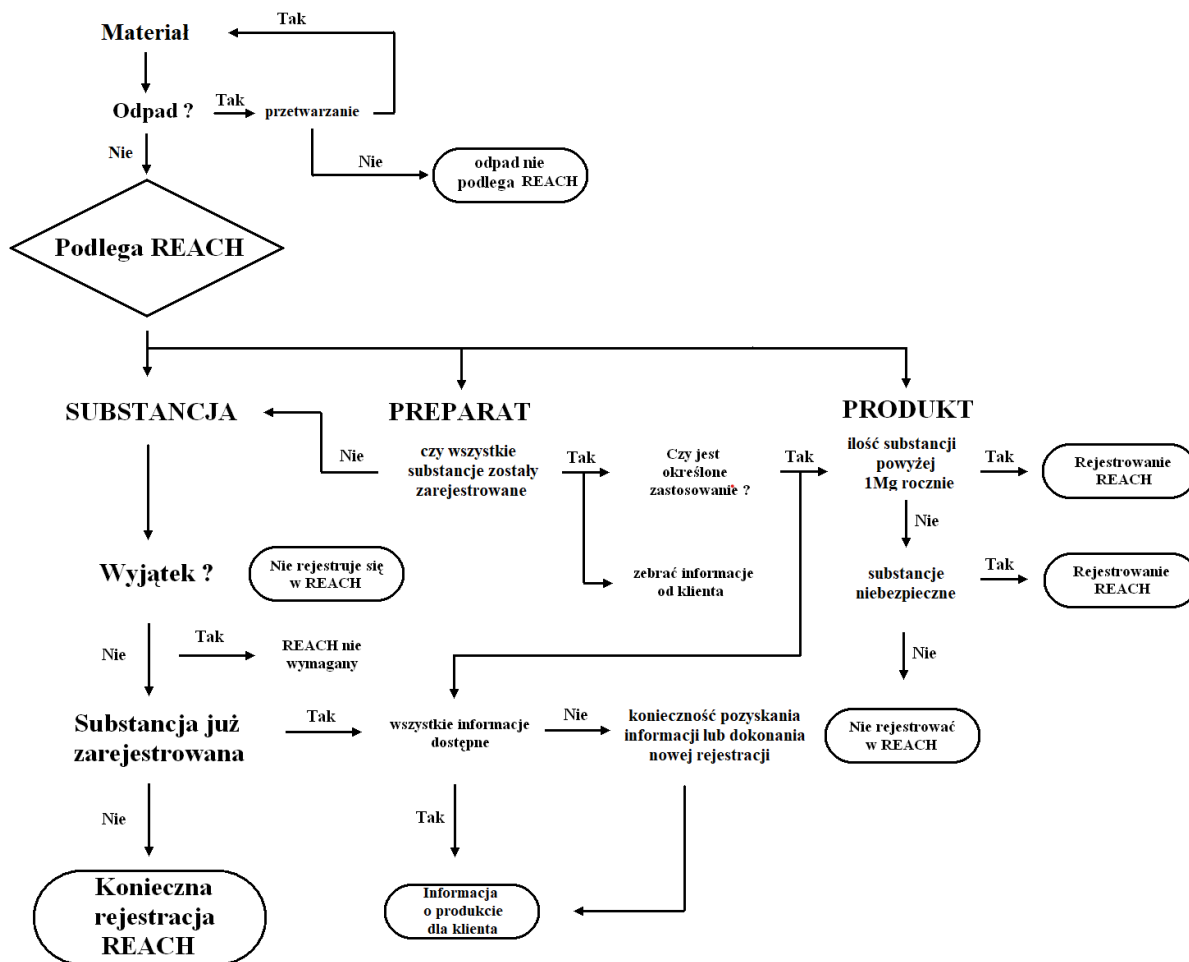
Popioły lotne i żużle znajdują obecnie zastosowanie przede wszystkim w budownictwie, ceramice, górnictwie i drogownictwie [Szponder 2012]. Ich zastosowanie jako surowca pociąga za sobą bardzo istotną konsekwencję prawną. Powoduje bowiem utratę przez te materiały prawnego statusu opadu w rozumieniu Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz implementującej jej postanowienia ustawy z 14 grudnia 2012 r. o odpadach i ich równoczesne uznanie za substancję w ujęciu art. 3 ust. 1 Rozporządzenia (WE) 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 roku w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów – REACH (Rys. 1). W konsekwencji, przed dopuszczeniem do obrotu handlowego, konieczne jest przeprowadzenie badań właściwości fizykochemicznych, toksykologicznych i ekotoksykologicznych w zakresie wymaganym przez REACH. W zakresie badań egzotoksycznych wymagane analizy dotyczą losów i zachowania substancji w środowisku. Za próbę oceny tego rodzaju właściwości uznać można przeprowadzenie testów wymywalności. Wyniki takich testów są normowane w zależności od przeznaczenia użycia odpadu (do celów podsadzkowych, budownictwa drogowego, budownictwa hydrotechnicznego itd.).

W badaniach przeprowadzono powtarzany w określonych interwałach czasowych test wymywalności żużli i popiołów lotnych. Celem badań było rozpoznanie składu chemicznego eluatów. Badania takie pozwalają na ocenę zagrożeń środowiskowych. Dodatkowo pokazują stopień jednorodności odpadów w długim okresie czasu, co jest istotne pod kątem ich użytkowego przeznaczenia.

Badania prowadzono w latach 2018–2019. Próbkę odpadów stanowiły żużle oraz popioły lotne. Były one pobierane z zakładu energetycznego oznaczonego symbolem EŁ. Pobór próbek odbywał się w cyklach 24-godzinnych w odstępach co 2,5 miesiąca. Wykonano 7 cykli badawczych.

Każdorazowo żużel i popiół był transportowany do akredytowanego laboratorium i w ciągu tygodnia poddawany pomiarowi odczynu oraz testowi wymywalności. Oznaczenie wartości pH w odpadach wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 10523:2012. Zastosowano podstawowy test wymywalności zwany porcjowym według normy PN-EN 12457:2006. Odpowiednie porcje odpadów wytrząsano z wodą dejonizowaną na wytrząsarce laboratoryjnej. Wyciągi wodne (eluaty) przefiltrowano i poddano analizom chemicznym. Zakres analiz był następujący:

- Na, K, As, Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, Cr – norma PN-EN ISO 11885:2009;
- Cl^- , SO_4^{2-} – norma PN-EN ISO 10304-1:2009/AC:2012.



Rys. 1. Zakres zastosowania rozporządzenia REACH w odniesieniu do odpadów.

Fig. 1. Scope of application of the REACH Regulation in relation to waste.

Stężenia substancji uzyskane w teście wymywalności odniesiono do wartości normatywnych dla ścieków przemysłowych wyszczególnionych w rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych [Dz.U. 2019, poz. 1311]. Wskazany akt prawny ujmuje w sposób kompleksowy wymagania odnoszące się do procesu wymywania wszystkich analizowanych w niniejszej pracy substancji.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Badane żużle i popioły lotne charakteryzowały się odczynem zasadowym. W całym okresie badań pH żużli zmieniało się w zakresie 10,10–10,80. Średnia wynosiła 10,50, a odchylenie standardowe 0,27. Popioły były bardziej alkaliczne, co wyrażały mierzone wartości pH – od 11,30 do 11,90. Średnia wynosiła 11,63, a odchylenie standardowe 0,19. Silnie zasadowy odczyn tych materiałów nie jest obojętny dla środowiska – jak dowodzą Ciećko i in. [2009] mogą one m.in. wykazywać działanie odkwaszające w stosunku do środowiska glebowego.

Omawiane odpady zarówno w przypadku składowania, jak i ich wykorzystania w formie mieszanin/produktów użytkowych (np. kruszyw drogowych, materiałów budowlanych) mogą

być źródłem zanieczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego wieloma substancjami chemicznymi jako efekt procesów wietrzeniowych [Żygadło i Woźniak 2009, Adamczyk i in. 2017]. Przeprowadzony test wymywalności dla poszczególnych próbek żużli i popiołów lotnych wykazał przede wszystkim wyraźnie wyższą zawartość wielu substancji w eluatach z popiołów, ale nierzadko także zróżnicowanie stężeń substancji podczas całego okresu badań (Tab. 1). Jednocześnie nie stwierdzono (z wyjątkiem siarczanów) przekroczenia dopuszczalnych stężeń substancji określonych dla ścieków przemysłowych wprowadzanych do środowiska [Dz.U. 2019, poz. 1311]. W konsekwencji, mając na uwadze ujawnianie przez test wymywalności potencjalnej migracji substancji, poddane badaniom odpady elektrowniane należy uznać za bezpieczne dla środowiska w analizowanym zakresie.

Tab. 1. Wyniki testu wymywalności odpadów z zakładu energetycznego EŁ w latach 2018–2019.

Tab. 1. Results of the leachability test of waste from the EŁ power plant in the years 2018–2019.

Substancja	Odpad	Numer cyklu badawczego						
		Stężenie [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]						
		1	2	3	4	5	6	7
Na	żużel	6,01	5,87	5,47	4,29	7,91	8,13	6,83
	popiół lotny	23,3	22,9	21,8	28,1	14,2	31,5	15,9
K	żużel	7,03	6,88	7,03	7,49	4,16	6,45	5,54
	popiół lotny	10,7	10,4	9,94	14,7	11,9	15,4	8,3
Cl^-	żużel	2,98	3,12	3,28	4,02	5,88	3,34	3,11
	popiół lotny	330	321	293	281	174	254	145
SO_4^{2-}	żużel	27,3	28,9	29,7	35,9	45,8	45,1	61,1
	popiół lotny	1547	1583	1638	1672	1792	974	1009
As	żużel	0,02	0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01
	popiół lotny	0,02	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01
Zn	żużel	0,002	0,002	0,005	0,01	0,012	0,004	0,003
	popiół lotny	0,019	0,023	0,028	0,045	0,011	0,024	0,008
Cd	żużel	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	popiół lotny	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cu	żużel	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	popiół lotny	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Pb	żużel	0,002	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003
	popiół lotny	0,019	0,015	0,009	0,028	0,006	0,005	0,005
Ni	żużel	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
	popiół lotny	0,06	0,055	0,043	0,014	0,032	0,023	0,007
Cr	żużel	0,006	0,004	0,007	0,001	0,023	0,032	0,015
	popiół lotny	0,102	0,114	0,128	0,184	0,043	0,065	0,075

Sód był wymywany z żużli w ilości średniej $6,36 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a w eluatach z popiołów lotnych zarejestrowano średnio $22,53 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (stężenie dopuszczalne w ściekach przemysłowych wynosi $800 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). Możliwe jest więc migrowanie sodu do środowiska gruntowo-wodnego. Zazwyczaj przemieszcza się on do głębszych warstw gleby ze względu na słabą podatność na sorbowanie przez cząstki glebowe. Warto pamiętać, że nadmiar sodu utrudnia roślinom pobieranie wody [Widłak 2016]. Pierwiastek ten może również zastępować w glebie wapń i magnez, niszcząc jej strukturę [Dojlido 1995].

Potas w środowisku gruntowo-wodnym należy do substancji biogenych, wpływających na eutrofizację wód [Burzyńska 2012 za: Vollenweider i Kerekes 1982]. Stąd też jego wprowadzanie do środowiska powinno być celowe, głównie w postaci materiału nawozowego (soli potasowych). Badania wykazały, że potas może migrować z odpadów elektrownianych w stężeniach bezpiecznych. W eluatach z żużli stwierdzono średnio $6,37 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ potasu,

a z popiołów lotnych średnio $11,62 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (stężenie dopuszczalne $80 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). Potas uwolniony ze związków, jako jon potasowy K^+ jest dość ruchliwy w gruntach i łatwo wymywany z gleb piaszczystych. W glebach z dużą ilością minerałów ilastych jest natomiast silnie wiązany nawet do jego wyczerpania.

Chlorki były wymywane w dużych ilościach z popiołów lotnych. Średnie stężenie jonów chlorkowych Cl^- w teście wymywalności wynosiło $257 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Eluaty z żużli zawierały znacznie mniej tych jonów – średnio na poziomie $3,68 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Stężenie dopuszczalne w ściekach przemysłowych wynosi $1000 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Jony chlorkowe ulegają silnemu wymywaniu z gruntów, gdyż są sorbowane tylko w sensie biologicznym, tzn. pobierane przez rośliny. Łatwo więc migrują w środowisku, przedostając się do wód, gdzie są podstawowym anionem. W wysokich stężeniach nadają wodzie słony smak i są szkodliwe dla roślin. Mogą też powodować korozję metalu [Dojlido 1995].

Siarka jest jednym z najbardziej aktywnych chemicznie pierwiastków. Zanieczyszczenie gruntów siarką skutkuje ich zakwaszeniem, a także występowaniem formy łatwo dostępnej dla roślin, czyli siarczanów [Motowicka-Terelak i Terelak 2000]. Siarczany były w dużych ilościach wymywane z badanych odpadów, zwłaszcza popiołów. Stężenia siarczanów (jonu siarczanowego SO_4^{2-}) w eluatach z popiołów wynosiły średnio aż $1459 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a w przypadku żużli było to zaledwie średnio $39 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Popioły lotne mogą być więc poważnym źródłem siarczanów wprowadzanych do środowiska gruntowo-wodnego – norma ich zawartości w ściekach przemysłowych wynosi $500 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Siarczany, obok pobierania przez rośliny, podlegają łatwemu wymywaniu z gleb i dalszej migracji. Powszechnie występują więc w wodach.

Arsen był wymywany zarówno z żużli, jak i z popiołów w podobnych ilościach wyrażonych stężeniami maksymalnie $0,02 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (stężenie dopuszczalne $0,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). Potwierdza to jego naturalną skłonność do immobilizacji – w środowisku gruntowym występuje głównie w formie związanej nawet w glebach zakwaszonych. Należy jednak pamiętać, że arsen jest toksyną, a w warunkach dużych stężeń tego pierwiastka dochodzi do degradacji biologicznej gleb, jego pobierania przez rośliny (choć nie pełni w nich żadnej funkcji fizjologicznej) i w efekcie zagrożenia zdrowia zwierząt i ludzi [Száková i in. 2009].

Cynk jest pierwiastkiem bardzo mobilnym w środowisku gruntowym, choć bywa też zakumulowany w warstwach powierzchniowych ze względu na tworzenie dość trwałych połączeń z substancją organiczną [Ociepa i in. 2013]. Stopień jego naturalnej kumulacji w glebach użytkowanych rolniczo wynosi zaledwie 1,5 ppm w okresie 10 lat [Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Badania wykazały, że cynk może przedostawać się do środowiska w niewielkich ilościach z odpadów elektrownianych. W eluatach z żużli stwierdzono średnio $0,005 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a z popiołów średnio $0,023 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ przy dopuszczalnym stężeniu $2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Cynk w środowisku jest elementem niezbędnym do rozwoju organizmów roślinnych i zwierzęcych, lecz w warunkach zanieczyszczenia i niskiego pH dochodzi do jego oddziaływań toksycznych.

W analizowanych eluatach nie stwierdzono obecności kadmu i miedzi. Jest to bardzo korzystne, gdyż oba te pierwiastki są silnie toksyczne o wysokich współczynnikach bioakumulacji [Gunkel i in. 2003, Zhang i in. 2011]. Warto wiedzieć, że szczególnie niebezpieczne jest rozprzestrzenianie kadmu (uznawanego za najbardziej toksyczny z metali ciężkich) z uwagi na bardzo łatwe pobieranie tego pierwiastka z gleby przez rośliny i jego kumulowanie w tkankach na wszystkich poziomach troficznych [Ociepa i in. 2013]. Jego dostępność dla roślin wzrasta w warunkach pogłębiającego się zakwaszenia gleby. Kadm, w przeciwieństwie do miedzi, jest pierwiastkiem niepotrzebnym do procesów życiowych.

Omawiane żużle i popioły zawierały ołów, co ujawnił test wymywalności. W eluatach z żużli pierwiastek ten występował w ilości średniej $0,002 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, natomiast w eluatach z popiołów zawartość była kilkukrotnie większa – średnio na poziomie $0,012 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, przy czym nadal w granicach stężenia dopuszczalnego $0,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Ołów nie jest potrzebny

w procesach fizjologicznych, stanowiąc toksynę [Johnson 1998]. Słabo migruje w środowisku glebowym i w warunkach naturalnych występuje raczej w poziomach związanych ze skałą macierzystą. W środowisku wodnym metal ten bywa często całkowicie zaadsorbowany w osadach. W roślinach ołów koncentruje się w korzeniach [Kabata-Pendias i Pendias 1999], stąd największe zagrożenie dla ludzi wynikające z jego rozprzestrzeniania dotyczy terenów upraw warzywnych.

W przypadku niklu praktycznie nie stwierdzono (z wyjątkiem jednego cyklu badawczego) jego występowania w eluatach z żużli, natomiast pojawił się w eluatach z popiołów lotnych w średnim stężeniu $0,033 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Stężenie dopuszczalne tego pierwiastka w ściekach przemysłowych wynosi $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Zaobserwowano tendencję zmniejszania stężenia niklu w okresie badawczym. Nikiel wprowadzony do środowiska gruntowego zachowuje się różnie, w zależności od granulometrii, składu mineralogicznego, odczynu oraz zawartości materii organicznej [Siebielec i in. 2012] – jest zarówno mobilny (np. w postaci chelatów), jak i związany (np. przez wodorotlenki żelaza i manganu). Postaci mobilne są łatwo przyswajalne przez rośliny.

Występowania chromu w środowisku, nawet w niewielkich stężeniach, nie można bagatelizować, gdyż może on wykazywać działanie toksyczne w zależności od wielu czynników agrochemicznych, zwłaszcza statusu pierwiastków pokarmowych [Nguyen i in. 2017]. Niebezpieczna jest zwłaszcza postać chromu Cr^{6+} , gdyż jony te mogą przenikać przez błony komórkowe. W środowisku glebowym Cr^{6+} ulega jednak dość łatwo redukcji do słabo rozpuszczalnego i pobieranego przez rośliny w niewielkich ilościach jonu Cr^{3+} [Siebielec i in. 2012]. Odpady elektrowniane mogą być źródłem chromu, na co wskazały wyniki badań. Średnie stężenie chromu w eluatach z żużli wynosiło $0,013 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, natomiast z popiołów $0,102 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Nie zostało przekroczone stężenie dopuszczalne na poziomie $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Warto dodać, że w badanych eluatach często stwierdzano różnice w stężeniu danej substancji w ciągu całego okresu badawczego. Różnice te, zwłaszcza w eluatach z popiołów lotnych sięgały kilkudziesięciu, a nawet ponad stu procent. Wskazuje to na potrzebę cyklicznego prowadzenia badań nad wymywalnością odpadów.

4. WNIOSKI

1. Popioły lotne i żużle elektrowniane mogą być źródłem wielu substancji chemicznych przedostających się do środowiska gruntowo-wodnego. Badania wymywalności nie wykazały migracji jedynie kadmu i miedzi.
2. Niektóre z uwalnianych z odpadów substancji są opisywane w literaturze jako toksyczne dla organizmów żywych, ale migracji podlegają też inne substancje, wpływające na cechy fizykochemiczne, a nawet pokarmowe środowiska gruntowo-wodnego.
3. Stężenia substancji w eluatach (z wyjątkiem siarczanów wymywanych z popiołów) nie przekraczały stężeń dopuszczalnych w ściekach przemysłowych wprowadzanych do środowiska. Popioły lotne uwalniały w badaniach znacznie większe ilości składników mineralnych niż żużle.
4. Zastosowanie odpadów elektrownianych w inżynierii lądowej lub wodnej należy poprzedzić analizą potencjalnego oddziaływania środowiskowego. Jak wykazały badania migracja substancji z różnych porcji odpadów pochodzących z tego samego zakładu energetycznego może być zróżnicowana.

LITERATURA

- Adamczyk Z., Grzesik B., Harat A. 2017. Środowiskowe skutki stosowania żużla hutniczego jako składnika kruszywa. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*, 23, 9–15.
- Borowski G. 2010. Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. *Inżynieria Ekologiczna*, 22, 52–62.
- Burzyńska I. 2012. Potas w glebie, roślinności i płytkich wodach gruntowych na tle zróżnicowanego użytkowania. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 12, 1, 49–58.
- Ciećko Z., Żołnowski A.C., Kulmaczewska J., Chelstowski A. 2009. Wpływ następczy melioracyjnych dawek popiołów z węgla kamiennego na kwasowość gleby. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 535, 73–83.
- Dojlido J.R. 1995. Chemia wód powierzchniowych. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy. Dz.U.UE.L.2008.312.3.
- Golimowski J., Koda E. 2007. Wpływ popiołów ze spalania węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach na środowisko glebowe i wód gruntowych. [W:] *Popioły z energetyki* (red. T. Szczygielski). EKOTECH, Szczecin, 253–263.
- Gunkel P., Roth E., Fabre B. 2003. Copper distribution in chemical soil fractions and relationships with maize crop yield. *Environmental Chemistry Letters*, 1, 92–97.
- Johnson F.M. 1998. The genetic effects of environmental lead. *Mutation Research*, 410, 123–140.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych. PWN, Warszawa.
- Motowicka-Terelak T., Terelak H. 2000. Siarka w glebach i roślinach Polski. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis seria Agricultura*, 204(81), 7–16.
- Nguyen K.L., Nguyen H.A., Richter O., Pham M.T., Nguyen V.P. 2017. Ecophysiological responses of young mangrove species *Rhizophora apiculata* (Blume) to different chromium contaminated environments. *Science of the Total Environment*, 574, 369–380.
- Norma PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności. Data publikacji: 22-10-2012.
- Norma PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku. Data publikacji: 14-10-2013.
- Norma PN-EN ISO 10523:2012 Jakość wody – oznaczanie pH. Data publikacji: 28-03-2012.
- Norma PN-EN 12457:2006 Charakteryzowanie odpadów – Wymywanie – Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów. Data publikacji: 23-02-2006.
- Norma PN-EN ISO 11885:2009 Jakość wody – Oznaczanie wybranych pierwiastków metodą optycznej spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP-OES). Data publikacji: 23-07-2009.
- Norma PN-EN ISO 10304-1:2009/AC:2012 Jakość wody – Oznaczanie rozpuszczonych anionów za pomocą chromatografii jonowej – Część 1: Oznaczanie bromków, chlorków, fluorków, azotanów, azotynów, fosforanów i siarczanów. Data publikacji: 29-04-2009, poprawka: kwiecień 2012.
- Ociepa E., Ociepa-Kubicka A., Okoniewska E., Lach J. 2013. Immobilizacja cynku i kadmu w glebach w wyniku stosowania substratów odpadowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15, 1772–1786.
- Olszewski P., Świnder H., Kulpa A., Ciszek K. 2012. Możliwość zagospodarowania wybranych odpadów z procesów czystych technologii węglowych. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko*, 4, 123–136.
- Rosik-Dulewska C., Karwaczyńska U. 2008. Methods of leaching contaminants from mineral waste in the aspect of its potential utilization in hydrotechnical construction. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 10, 205–219 (in Polish).
- Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. Dz.U. 2020, poz. 10.
- Rozporządzenie (WE) Nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 roku w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH) i utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów, zmieniające dyrektywę 1999/45/WE oraz uchylające rozporządzenie Rady (EWG) nr 793/93 i rozporządzenie Komisji (WE) nr 1488/94, jak również dyrektywę Rady 76/769/EWG i dyrektywy Komisji 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/WE i 2000/21/WE. Dz.U.UE.L396.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych. Dz.U. 2019, poz. 1311.
- Rzepecki K. 2011. Sposób zagospodarowania odpadów paleniskowych z Elektrowni Turów i problemy z tym związane. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 35, 3, 307–315.

- Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Terelak H., Koza P., Hryńczuk B., Łysiak M., Miturski T., Gałązka R., Suszek B. 2012. Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012 (raport końcowy). Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa PIB, Puławy.
- Szaková J., Tlustoš P., Goessler W., Frková Z., Najmanová J. 2009. Mobility of arsenic and its compounds in soil and soil solution: the effect of soil pretreatment and extraction methods. *Journal of Hazardous Materials*, 172, 1244–1251.
- Szponder K. 2012. Badanie wybranych właściwości popiołów lotnych z zastosowaniem analizy obrazu. Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo-Hutniczna w Krakowie, Kraków.
- Ustawa z dnia 12 września 2002 r. o normalizacji. Dz.U. 2002 Nr 169, poz. 1386.
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz.U. 2013, poz. 21.
- Vollenweider R.A., Kerekes J.J. 1982. Eutrophication of waters – monitoring, assessment and control. Published by Environmental Directorate OECD, Paris.
- Widłak M. 2016. Przyrodniczy wskaźnik zasolenia gleby. *Proceedings of ECOpole*, 10(1), 359–365.
- Zhang H.Z., Li H., Wang Z., Zhou L.D. 2011. Accumulation characteristics of copper and cadmium in greenhouse vegetable soils in Tongzhou District of Beijing. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 289–294.
- Żygadło M., Woźniak M. 2009. Obserwacje zmian właściwości popiołów powęglowych w procesach wietrzeniowych. *Energetyka*, 11, 771–775.