

OCENA WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNYCH I GEOTECHNICZNYCH MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŻŁOWEJ Z ELEKTROWNI SKAWINA SA W MODELOWYM BADANIU ZAPORY ZIEMNEJ

CHEMICAL AND GEOTECHNICAL PROPRIETIES OF ASH-SLAG MIXTURE FROM SKAWINA POWER PLANT TESTED IN A MODEL STUDY OF EARTHEN DAM

Mariusz Cholewa, Artur Szwalec, Paweł Mundała

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W modelu zapory ziemnej zbudowanej w korycie hydraulicznym badano podstawowe właściwości chemiczne i geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej, pozyskanej z Elektrowni Skawina SA. Dysponując piezometrami pozwalającymi ująć wody: górną, dolną oraz filtrującą przez nasyp, badano ich jakość po dobowej i dwudziestopięciodobowej ekspozycji. Wykorzystano wodę wodociągową – ze względu na lokalizację jednostki była to woda z Wodociągów Krakowskich. Z właściwości fizycznych badano skład granulometryczny gruntu, wskaźnik różnoziarnistości, wilgotność naturalną, gęstość objętościową, gęstość objętościową szkieletu, wilgotność optymalną, maksymalną gęstość objętościową szkieletu, współczynnik filtracji. Sklasyfikowano grunt według norm PN-B-02481:1998 i PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009. Wykreślono krzywą filtracji. Materiał nasypu – z uwagi na jego parametry geotechniczne – bardzo łatwo poddawał się zjawisku sufozji. Pomierzone objętościowe natężenie przepływu było w przedziale 1700–2500 cm³ · godz.⁻¹. Z właściwości chemicznych badano stężenia ośmiu metali, konduktancję i pH wód dolnej, górnej i z korpusu zapory przy ekspozycjach po jednej i dwudziestu pięciu dobach. Warunki ługowalności badanych składników były odmienne od założonych w normie [Rozporządzenie... 1999], jednak znacznie bardziej zbliżone do warunków na pograniczu budowla wodna – ekosystem. Analizując zawartości metali, wartości pH oraz konduktancji w odciekach uzyskiwanych z piezometrów rozmieszczonych w modelu zapory, należy stwierdzić, iż badany materiał wpływa na zmianę chemizmu wód mających z nim bezpośredni kontakt, szczególnie w odniesieniu do zawartości

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Mariusz Cholewa, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, dr inż. Artur Szwalec, dr inż. Paweł Mundała, Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: mcholewa@ar.krakow.pl, rmszwale@cyf-kr.edu.pl, rmmunda@cyf-kr.edu.pl.

Na, K, Ca i Mg, przekraczając dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych normy [Rozporządzenie... 2008, Rozporządzenie... 2011]. Ołów, kadm oraz chrom występują w stosunkowo wyrównanych zakresach w obu okresach ekspozycji, spełniając równocześnie dopuszczalne normy dla wód powierzchniowych i podziemnych oraz normy w przypadku wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi [Rozporządzenie...2006, Rozporządzenie... 2008, Rozporządzenie... 2011].

Abstract. Basic chemical and geotechnical properties of an ash-slag mixture from Skawina Power Plant were tested in a dam model, which was built in a medium-sized apparatus for testing the filtration through the embankment models. Piezometers in the apparatus allowed taking samples of the upper water, lower water and water filtrating throughout the dam. Tap water was used in the experiment model, which due to the localization was Krakow city water. Chemical properties were examined for water samples taken after a day and twenty five days of the experiment. From geotechnical properties following were tested: grain size distribution, uniformity coefficient, natural moisture content, wet bulk density, dry density of solid particles, optimum moisture content, maximum dry density of solid particles and permeability coefficient. Soils were classified according to the following standards: PN-B-02481:1998 and PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009. Additionally filtration curve was drawn. Embankment material, due to its geotechnical parameters, very easily succumbed to a suffusion phenomenon. Measured volumetric flows were in the range of $1700\text{--}2500\text{ cm}^3 \cdot \text{hour}^{-1}$.

After a day and again after twenty five days following chemical prosperities of each water (upper, lower, filtrating throughout the embankment material) were tested: conductance, reaction, metal contents (Cd, Cr, Cu, Pb, Ca, K, Mg, Na). Leaching conditions in the experiment were different from those assumed in a standard [Rozporządzenie...1999], however they were much closer to the ones on the borderline of ecosystem and water construction. It was stated that the tested ash-slag mixture has an influence on the tap water used in experiment, particularly in case of reaction, conductance and metals contents (mainly Na, K, Ca and Mg). Determined sodium, potassium, calcium and manganese contents were higher than allowed in standards for surface and ground water [Rozporządzenie... 2011, Rozporządzenie... 2008]. Cadmium, chromium and lead contents were in narrow ranges (Cd and Cr) often below the spectrophotometer determination level. In all cases determined contents were lower than permissible levels for surface and ground water. Additionally, requirements for substances, which are allowed to be put in water or ground were fulfilled [Rozporządzenie... 2011, Rozporządzenie... 2008, Rozporządzenie... 2006].

Słowa kluczowe: mieszanina popiołowo-żuźłowa, zapora, właściwości geotechniczne, właściwości chemiczne

Key words: ash-slag mixture, dam, geotechnical properties, chemical properties

WSTĘP

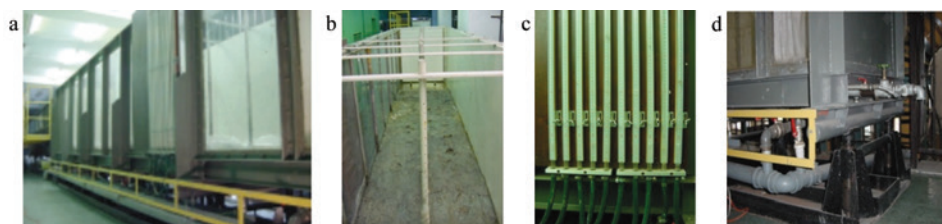
Produkcja energii elektrycznej z kopaliny stałych wiąże się z wytwarzaniem w elektrowniach i elektrociepłowniach różnorodnych odpadów energetycznych, takich jak popioły lotne, żużle, mieszaniny popiołowo-żuźłowe, mikrosfery, popioły z kotłów fluidalnych, gips z odsiarczania spalin metodą mokrą wapienną, odpady z odsiarczania spalin metodami półsuchymi i suchymi, ogólnie zwanych ubocznymi produktami

spalania (UPS) [Plewa i in. 2007]. Powstające odpady energetyczne były lokowane na składowiskach, a ostatnio są coraz szerzej wykorzystywane gospodarczo, głównie do produkcji cementu i materiałów budowlanych oraz w drogownictwie, rekultywacji terenu, wypełniania podziemnych wyrobisk, a w ograniczonym zakresie także do celów rolniczych [Góra 1986, Kušnierova i in. 2011]. Ostatnio dużo uwagi poświęca się drobnej frakcji popiołów lotnych, tzw. mikrosfer, które stają się nowoczesnym materiałem stosowanym w różnych gałęziach przemysłu [Fenelonov i in. 2010, Hirajima i in. 2010, Haustein i Quand 2011]. Prowadzi się również próby nad wykorzystaniem UPS do celów budownictwa hydrotechnicznego, np. do uszczelniania materiałów gruboziarnistych. Pojawia się jednak ryzyko narażenia sąsiadujących ekosystemów na emisję substancji zawartych w popiołach lotnych i mieszaninach popiołowo-żużlowych, m.in. metali ciężkich i alkalicznych.

Celem badań była ocena podstawowych właściwości chemicznych i geotechnicznych mieszaniny popiołowo-żużlowej pochodzącej z Elektrowni Skawina S.A. pod kątem ich wpływu na ekosystemy wodne w warunkach eksploatacji modelu zapory.

METODYKA BADAŃ

Stanowisko badawcze zorganizowano w korycie hydraulicznym (ryc. 1), o wymiarach wewnętrznych: długość 600 cm, szerokość 100 cm, wysokość 120 cm. Wewnątrz koryta umieszczono przegrody przelewowe, umożliwiające dowolną regulację poziomu wody górnej i dolnej, oraz rurki piezometryczne do pomiaru poziomu wody wewnątrz modelu obwałowania. Odpowiedni system przewodów i przelewów umożliwiał regulację dopływającej wody i pomiar wydatku filtracyjnego przepływającego przez nasyp [Cholewa 2008, Cholewa i Baran 2013].



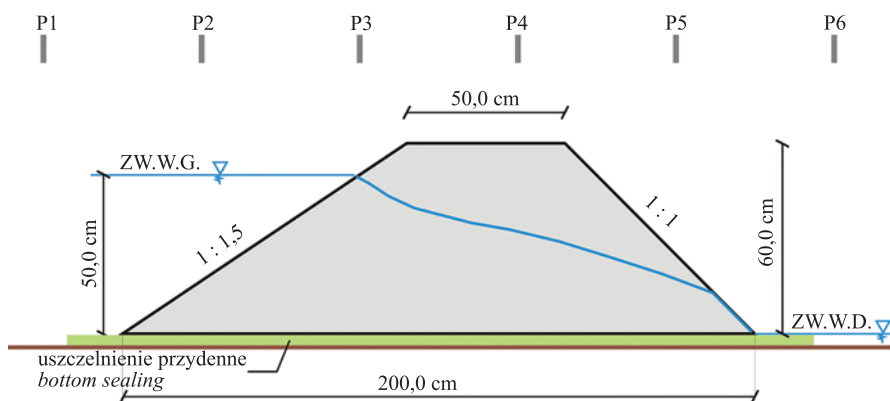
Ryc. 1. Średniowymiarowy aparat do badania filtracji przez modele nasypów: a) widok ściany czołowej, b) wnętrze koryta z ilowym uszczelnieniem przydennym, c) tablica pomiarowa do odczytu poziomu wody w piezometrach, d) zawory pomiarowo-upustowe

Fig. 1. Medium-sized apparatus for testing filtration through embankments models: a) headwall view, b) inside of the apparatus with the clayey bottom sealing, c) measurement board for water level in piezometers, d) measurement-and-spillway valves

Nasyp modelowy z mieszaniny popiołowo-żużlowej budowano w korycie hydraulicznym warstwami o grubości 10 cm, zagęszczając je mechanicznie do $I_s = 0,95$. Po zakończeniu prac formujących rozpoczynano piętrzenie wody górnej z prędkością $10 \text{ cm} \cdot \text{godz.}^{-1}$, co pozwoliło osiągnąć pełny poziom piętrzenia po pięciu godzinach.

Następnie w odstępach 1-dobowych mierzono wydatek filtrującej przez nasyp wody oraz dokonywano odczytów położenia zwierciadła wody w piezometrach zainstalowanych w rozstawie poziomej co 50 cm. Po upływie doby i dwudziestu pięciu dób, w dwóch powtórzeniach pobrano próbki wody górnej (P1), z korpusu (P4) oraz dolnej (P6) w celu oznaczenia zawartości metali alkalicznych (Ca, Na, K, Mg) oraz śladowych (Cd, Pb, Cr, Cu) a także pH i przewodności elektrolitycznej. Zawartości metali oznaczono metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej FASA na aparacie Solaar M6 firmy Unicam. Przewodność elektrolityczną oznaczono konduktometrycznie, a pH potencjometrycznie [Ostrowska i in. 1991]. Uzyskane w modelu wyniki analizowano pod kątem wpływu badanej mieszanki popiołowo-żuźłowej w warunkach eksploatacji modelu zapory na środowisko wodne.

Wymiary geometryczne modelu przedstawiono na ryc. 2. Model wykonano na podłożu iłowym o grubości 4 cm, które zastępowało warstwę nieprzepuszczalną.



Ryc. 2. Przekrój poprzeczny przez model nasypu (P1–P6 – piezometry)

Fig. 2. Cross-section through the model embankment (P1–P6 – piezometers)

WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNYCH MIESZANINY POPIOŁOWO-ŻUŹŁOWEJ

Elektrownia Skawina S.A. prowadziła współspalanie biomasy z węglem kamiennym. Ze względów technologicznych udział biomasy w spalonym materiale nie przekraczał 10% wagowo. Badany odpad był wygarniany z dolnej części kotła, rozdrabniany, odziarniany i podajnikami transportowany na hałdę wewnątrz zakładu. Pod względem geotechnicznym popioło-żuźel można scharakteryzować jako piasek zapyłony o zawartości frakcji najdrobniejszych $f_{\pi+i} = 24,87\%$. Podstawowe parametry geotechniczne materiału zestawiono w tabeli 1.

W nasypie modelowym wykonanym z mieszanki popiołowo-żuźłowej, pełny poziom piętrzenia osiągnięto po 5 godzinach. Pojawienie się przesiąkającej wody w podstawie skarpy odpowietrznej nastąpiło po 8 godzinach i 20 minutach. Materiał na skarpie odpowietrznej został zawilgocony do wysokości 15 cm od dna modelu. Przebieg

krzywej filtracji w korpusie modelu (ryc. 2) wykreślony na podstawie pomiarów piezometrycznych obrazuje zjawisko przesiąkania wody przez nasyp. Krzywa filtracji jest praktycznie linią prostą przecinającą skarpe odpowietrzną na wysokości 15 cm. Jej przebieg wskazuje na mały opór hydrauliczny mieszanki popiołowo-żużlowej przy tych wymiarach geometrycznych nasypu. Przecięcie krzywej filtracji z powierzchnią niezabezpieczonej skarpy odpowietrznej spowodowało wymywanie materiału z jej podstawy. Z uwagi na parametry geotechniczne (tab. 1) materiał nasypu bardzo łatwo poddawał się zjawisku sufozji. Pomierzone objętościowe natężenie przepływu było w przedziale $1700\text{--}2500\text{ cm}^3 \cdot \text{godz.}^{-1}$.

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna mieszaniny popiołowo-żużlowej

Table 1. Geotechnical characteristics of the ash-slag mixture

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Wartość Value
Zawartość frakcji wg PN-EN ISO 14688-1:2006 Fraction content acc. to PN-EN ISO 14688-1:2006		19,36
• żwirowa – gravel 2–63 mm	%	55,77
• piaskowa – sand 0,063–2 mm		22,38
• pyłowa – silt 0,002–0,063 mm		2,49
• ilowa – clay $\leq 0,002$ mm		
Rodzaj gruntu według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 Kind of soil acc. to PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009	–	siSa
Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient	–	14,71
Wilgotność naturalna Natural moisture content	%	40,83
Gęstość objętościowa Bulk density	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,456
Gęstość objętościowa szkieletu Dry density of solid particles	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,078
Wilgotność optymalna Optimum moisture content	%	35,00
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density of solid particles	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,135
Współczynnik filtracji k_{10} (dla $I_s = 0,95$) Permeability coefficient k_{10} (at $I_s = 0,95$)	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3,95 \cdot 10^{-6}$

WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNYCH MIESZANINY

Prowadzone badania odczynu odcieków pobranych z piezometrów umieszczonych w modelu zapory (tab. 2) wykazały po 1-dobowej ekspozycji zróżnicowanie o amplitudzie 0,9 (tab. 2). Najniższym odczynem (pH = 6,7) charakteryzowała się próbka pobrana z piezometru P4 umieszczonego w korpusie zapory, wyższym i w miarę wyrównanym odczynem charakteryzowały się próbki pobrane od strony wody górnej (P1)

Tabela 2. Zawartość składników rozpuszczalnych w pobieranych odciekach po dobie i dwudziestu pięciu dobach ekspozycji pobranych z piezometrów P1, P4 i P6

Table 2. Contents of soluble elements in the leachate taken after a day and twenty five days exposition from P1, P4 and P6 piezometers

Lp.	Oznaczany wskaźnik Parameter	Jednostka Unit	Zawartość w odcieku Content in the effluent		
			P1	P4	P6
Właściwości po dobie ekspozycji Properties after a day of the experiment					
1	pH	–	7,3	6,7	7,6
2	Konduktancja Conductance	mS · cm ⁻¹	0,593	2,7	2,5
3	Cd	μg · dm ⁻³	0,29	0,29	0,29
4	Pb		2,1	1,25	2,3
5	Cu		19	5	5
6	Cr		2,5	2,5	2,5
7	Na		29	151,6	141,9
8	K	mg · dm ⁻³	9,1	194	159,5
9	Ca		71,9	171,8	141,6
10	Mg		11,3	76,8	128,3
Właściwości po dwudziestu pięciu dobach ekspozycji Properties after a twenty five days of the experiment					
1	pH	–	6,8	6,7	6,7
2	Konduktancja Conductance	mS · cm ⁻¹	0,417	0,581	0,617
3	Cd	μg · dm ⁻³	0,29	0,29	0,29
4	Pb		2,0	1,25	3,7
5	Cu		22	2,0	3,0
6	Cr		2,5	2,5	2,5
7	Na		15,9	31,2	33,0
8	K	mg · dm ⁻³	5,3	31,9	40,2
9	Ca		56,0	39,4	35,0
10	Mg		8,8	16,3	22,7

(pH = 7,3) oraz wody dolnej (P6) (pH = 7,6). Obniżony odczyn w odcieku z korpusu zapory może być spowodowany wpływem wykorzystanego materiału. W badaniach prowadzonych na eluatach uzyskanych z mieszaniny popiołowo-żużlowej z tego samego źródła [Gruchot i in. 2012] wykazano, iż charakteryzują się one stosunkowo niskim odczynem (pH = 6,5). Obniżony i bardzo wyrównany odczyn rejestrowany był także we wszystkich próbkach pobranych po ekspozycji 25-dobowej (tab. 2). W trakcie tego okresu w procesie dyfuzji występowało mieszanie się materiału i wody na wszystkich przekrojach badawczych modelu, co wpłynęło na zmianę, tj. wyrównanie się wartości pH, potwierdzając równocześnie wpływ badanej mieszaniny na ten parametr. Wyciągi wodne z odpadów energetycznych charakteryzuje na ogół silna zasadowość, pH 9,0–12,0 [Rosik-Dulewska i Karwaczyńska 2008]. Jednakże bardzo wysoka wartość pH występuje tylko w początkowym okresie składowania emulgatów popiołowo-wodnych. Na składowiskach zachodzą bowiem procesy zobojętniania, które w konsekwencji zmieniają charakter wyciągów wodnych wynoszonych do środowiska. Wartość pH wraz z upływem czasu składowania obniża się, jednak nie do tak niskich wartości jak zanotowane w badanym materiale [Boroń i Ryczek 1993, 1997]. Filtry z popiołów charakteryzują się na ogół wysoką zawartością soli – w ich składzie występują głównie siarczany: wapnia, magnezu, potasu oraz w mniejszej ilości sodu. Sole te są łatwo i szybko wypłukiwane, ale na ogół nie stanowią zagrożenia dla człowieka, mogą jednak ujemnie wpływać na środowisko gruntowo-wodne [Woźniak i Żygadło 2002]. Uzyskane po dobowej ekspozycji wartości konduktancji wyniosły 0,593 (P1), 2,5 (P4) i 2,7 (P6) $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ (tab. 2). Zawartości te w próbkach pobieranych z korpusu zapory (P4) lub wody dolnej (P6) w odniesieniu do wartości uzyskiwanych w próbkach wody górnej (P1) są wyraźnie wyższe dla: wartości konduktancji (4,6 raza), zawartości Na (5 razy), K (21 razy), Ca (2,4 razy) i Mg (11 razy). Taki stan rzeczy świadczy o znacznym wpływie badanej mieszaniny na jakość wód. Zmiany te można tłumaczyć oddziaływaniem filtrującej przez korpus modelu zapory wody, która rozpuszcza i wymywa omawiane metale. Podobnie jak dla pH można przypuszczać, że na zasadzie dyfuzji następuje wyrównanie zasolenia w całej objętości wody w modelu. Stężenie jonów po dwudziestu pięciu dobach znacząco spada do 0,417 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ i rośnie w kierunku infiltrującej wody przez 0,581 do 0,617 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. Nawet pomijając tło konduktancji wody wodociągowej w Krakowie, ukazuje się obraz rzeczywistego wzrostu zasolenia. Znacząco wyższe wartości konduktancji tj. 450 i 460 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ oznaczyli Gruchot i in. [2012, 2013] w mieszaninach popiołowo-żużlowych pochodzących z Elektrowni Skawina oraz Elektrociepłowni Zakładów Azotowych w Tarnowie. Należy zauważyć, iż ze względu na konduktancję próbki wody pobierane z korpusu zapory (P4) i stanowiska wody dolnej (P6) nie spełniają wartości dopuszczalnych dla wód powierzchniowych i podziemnych [Rozporządzenie... 2008, Rozporządzenie... 2011] oraz wymagań w sprawie substancji szczególnie szkodliwych wprowadzanych do wód lub ziemi [Rozporządzenie... 2006].

Znacznie mniejsze zróżnicowanie obserwowane jest w odniesieniu do stężeń pierwiastków śladowych w ocenianych odciekach. Uznawane za substancje priorytetowe dla jakości wód ołów, kadm oraz szczególnie szkodliwy chrom występują w stosunkowo wyrównanych zakresach w obu badanych okresach ekspozycji (tab. 2). Wszystkie oznaczone zawartości kadmu i chromu były bardzo niskie i nie przekroczyły progu oznaczalności użytego spektrofotometru, tj. dla kadmu 0,29 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ i dla chromu 2,5 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Zawartości ołowiu charakteryzowały się zmiennością w zakresie 1,25–3,7 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ i były wyższe od oznaczonych (1,0–1,2 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$) w badaniach Gruchota i in. [2012, 2013], a równocześnie znacząco niższe od wyników (330 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$) podawanych przez Rosik-Dulewską i Karwaczyńską [2008]. Zawartości Cd, Cr i Pb spełniają normy dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych oraz w sprawie wymagań dla ścieków wprowadzanych do wód lub ziemi [Rozporządzenie... 2006, Rozporządzenie... 2009, Rozporządzenie... 2011]. Inna sytuacja ma miejsce w przypadku miedzi – wyższe stężenia tego metalu występują w odciekach ze strony wody górnej, przekraczając wartości dopuszczalne dla wód podziemnych [Rozporządzenie... 2008]. Stan taki może być spowodowany łągowaniem tego pierwiastka w warunkach niższego pH, na co wskazują Adamczyk i Skrzypczak [2004], a takie właśnie warunki występują od strony wody górnej (tab. 2). Jednakże oznaczona maksymalna zawartość miedzi w wodzie górnej (22 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$) jest około dziewięć razy niższa niż dopuszczalna dla ścieków wprowadzanych do wód [Rozporządzenie... 2006]. Z danych literaturowych dotyczących występowania pierwiastków śladowych w popiołach wynika, że większość tych pierwiastków koncentruje się w strukturach stabilnych faz glinokrzemianowych, które nie ulegają lub tylko w niewielkim stopniu ulegają wylugowaniu w wodzie, w związku z czym ich zawartość w eluacie jest zwykle na granicy wykrywalności spektrofotometru i tylko w nielicznych przypadkach przekracza granice dopuszczalne dla wód pitnych i powierzchniowych [Rosik-Dulewska i Karwaczyńska 2008, Kapuściński i Strzałkowska 2005]. W wodnym eluacie z popiołów świeżych Adamczyk i Skrzypczak [2004] zaobserwowali wyższe zawartości pierwiastków takich jak kadm, kobalt, chrom, mangan, nikiel i cynk w porównaniu z popiołem składowanym przez rok. Prowadzone przez nich badania pozwoliły również ustalić wpływ pH na zdolność wymywania poszczególnych składników. Dla takich pierwiastków jak: Cd, Co, Cr, Ti, Zn odczyn nie ma wyraźnego wpływu na zdolność łągowania ich z popiołów. Z kolei odczyn lekko kwaśny (pH = 5), sprzyja wymywaniu z popiołów związków ołowiu i żelaza, a związki miedzi są intensywnie łągowane do roztworu przy pH = 7–8.

W ocenie uzyskanych wyników należy jednak pamiętać, że badany model wykonano na podłożu ilowym zastępującym warstwę nieprzepuszczalną, który też mógł mieć wpływ na wyniki pomiaru zawartości metali w próbkach wód. Minerale ilaste zaliczane są bowiem do najważniejszych substancji odpowiedzialnych za sorpcję jonów metali w środowisku naturalnym [Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Innymi potencjalnymi czynnikami mogącymi mieć wpływ na chemizm ocenianych odcieków są materiały wykorzystane w budowie koryta hydraulicznego (metalowe konstrukcje, pokrycia antykorozyjne, uszczelnienia), w którym były prowadzone niniejsze badania. Z tego względu niezbędne jest kontynuowanie badań, co pozwoli zminimalizować lub całkowicie wyeliminować wpływ tych dodatkowych czynników.

WNIOSKI

1. Badany materiał wpływa na zmianę chemizmu wód mających z nim bezpośredni kontakt szczególnie w odniesieniu do konduktancji, która przekracza dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych normy.

2. Uznawane za substancje szkodliwe dla jakości wód ołów, kadm oraz chrom występują w stosunkowo wyrównanych zakresach bez względu na zastosowany czas ekspozycji, spełniając równocześnie dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych normy.
3. Wyższe stężenia miedzi występujące w odciekach z piezometru P2, a przekraczające wartości dopuszczalne dla wód podziemnych, mogą być spowodowane ługowaniem tego pierwiastka w warunkach podwyższonego pH.

PIŚMIENNICTWO

- Adamczyk Z., Skrzypczak K., 2004. Wymywanie metali ciężkich z popiołów lotnych Elektrowni Opolo w zależności od pH roztworów ługujących. *Ochr. Powiet. Probl. Odpad.* 6, 215–219.
- Boroń K., Ryczek M., 1993. The effect of the power-plant ash yard in Przechlebie on pollution of soils and plants in the adjacent area. 4-th Intern. Symp. on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Krakow, Poland, September 6–10, t. II, 553–559.
- Boroń K., Ryczek M., 1997. The influence of the power plant ash yard in Przechlebie on some chemical properties of adjacent soils and plants. *Green 2: Contaminated and derelict lands.* London – Tokyo – Reston (USA) – Victoria (Australia), 103–109.
- Cholewa M., Baran P., 2013. Modeling of permeability flow in embankments formed from ash-slag mixture. *Ann. Set The Environ. Prot. – Rocz. Ochr. Środ.* 15, 479–491.
- Cholewa M., 2008. Modelowe badania filtracji przez nasypy hydrotechniczne wykonane z gruntów antropogenicznych. *Przeg. Górn.* 11/12, 49–55.
- Drozhzhin V.S., Shpirt M.Y., Danilin L.D., Kuvalev M.D., Pikulin I.V., Potemkin G.A., Redyushev S.A., 2008. Formation processes and main properties of hollow aluminosilicate microspheres in fly ash from thermal power stations. *Solid Fuel Chem.* 42(2), 107–119.
- Fenelonov V.B., Mel'gunov M.S., Parmon V.N., 2010. The properties of cenospheres and the mechanism of their formation during high-temperature coal combustion at thermal power plants. *KONA, Power Partic. J.* 28, 189–208.
- Góra E., 1986. Wpływ popiołów z węgla kamiennego na plonowanie roślin. *Zesz. Nauk. AR Krak., Rozpr. Habil.* 101.
- Gruchot A., Szwalec A., Mundała P., 2012. Geotechnical and chemical characteristics of ash and slag mixture of Skawina Power Plant (Poland). *Geologija, Vilnius* 54(2), 27–34.
- Gruchot A., Szwalec A., Mundała P., 2013. Chemical and geotechnical properties of ash-slag mixture from “Czajka” landfill near Tarnow. *Ochr. Środ. Zas. Nat.* 24, 2(56), 1–6.
- Haustein E., Quant B., 2011. Charakterystyka wybranych właściwości mikrosfer –frakcji popiołu lotnego – ubocznego produktu spalania węgla kamiennego. *Gospod. Surow. Mineral.* 27(3), 95–111.
- Hirajima T., Petrus H.T.B.M., Oosak o Y., Nonaka M., Sasaki K., Ando T., 2010. Recovery of cenospheres from coal fly ash using a dry separation process: Separation estimation and potential application. *Intern. J. Miner. Process.* 95, 18–24.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych.* Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- Kapuściński T., Strzałkowska E., 2005. Ługowalność pierwiastków podstawowych i śladowych z odpadów paleniskowych lokowanych w wyrobiskach górniczych. *Gospod. Surow. Mineral.* 21(3), 37–46.
- Kušnierova M., Praščakova M., Čablik V., Fečko P., 2011. Energetic wastes as an equivalent for primary non metallic materials. *J. Polish Mineral Engineering Society* 1(27), 73–79.

- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z., 1991. Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. Wydawnictwo IOŚ Warszawa.
- Plewa F., Popczyk M., Mysłek Z., 2007. Rodzaje produktów wytwarzanych w energetyce zawodowej i możliwości ich wykorzystania w podziemnych technologiach górniczych. *Polit. Energ.* 10(2), 391-402.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009. Badania laboratoryjne gruntów, Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego. Badania geotechniczne.
- PN-B-02481:1998. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar. Geotechnika.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Cz. 1. Badania geotechniczne. Oznaczanie i opis.
- Rosik-Dulewska Cz., Karwaczyńska U., 2008. Metody ługowania zanieczyszczeń z odpadów mineralnych w aspekcie możliwości ich zastosowania w budownictwie hydrotechnicznym. *Rocz. Ochr. Środ.* 10, 205–219.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. *Dz.U.* z 2006 r. Nr 137, poz. 984.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 lipca 2008 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu wód podziemnych. *Dz.U.* z 2008 r. Nr 143, poz. 896.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. *Dz.U.* z 2011 r. Nr 257, poz. 1545.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 21 grudnia 1999 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie opłat za składowanie odpadów. *Dz.U.* z 1999 r. Nr. 110, poz. 1263.
- Woźniak M., Żygadło M., 2002. Monitoring składowisk odpadów paleniskowych. *Kieleckie Towarzystwo Naukowe – Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego* 3, 117–122.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.12.2014