

Franciszek PLEWA*, Piotr PIERZYNA**, Jerzy KANAFEK***

Ocena porozymetrycznych i filtracyjnych właściwości hydromieszanin popiołu lotnego do budowy barier izolacyjnych podziemnych składowisk

STRESZCZENIE. Ilość powstających odpadów energetycznych skłania do poszukiwania nowych możliwości ich wykorzystywania np. do budowy barier izolacyjnych w składowiskach odpadów. Podstawowym warunkiem, jaki musi spełniać materiał stanowiący barierę izolacyjną, jest warunek szczelności. Szczelność scharakteryzowana jest poprzez współczynnik filtracji, którego wartość nie może przekraczać $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. O wielkości współczynnika filtracji decyduje porowatość aktywna materiału, a więc pory o średnicy większej niż $0,2 \mu\text{m}$. W niniejszym artykule przedstawiono możliwość wykorzystania wybranych odpadów energetycznych do budowy barier izolacyjnych poprzez ocenę ich własności porozymetrycznych i filtracyjnych. Porowatość otwarta (n_o) zestalonych hydromieszanin popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” wynosi średnio 20,41%, a porowatość aktywna (n_a) średnio 3,04%. O porowatości otwartej n_o zestalonej hydromieszaniny popiołu decydują pory subkapilarne generalnie w zakresie średnic $0,01-0,1 \mu\text{m}$. Natomiast współczynnik filtracji omawianego materiału w zależności od metody badawczej wyniósł $1,55E-10$ m/s dla permeametry Kamieńskiego oraz $1,81E-9$ m/s dla „Flow pump”.

SŁOWA KLUCZOWE: górnictwo, Uboczne Produkty Spalania, bariery izolacyjne, składowiska odpadów, właściwości filtracyjne i porozymetryczne

* Prof. dr hab. ** Dr inż. — Politechnika Śląska, Gliwice; e-mail: piotr.pierzyna@polsl.pl
*** Mgr inż. — PPH UTEX Sp. z o.o., Rybnik

Wprowadzenie

Wykorzystanie odpadów energetycznych przez górnictwo podziemne stanowi największą alternatywę dla ich powierzchniowego składowania, co jest korzystne głównie z punktu widzenia ochrony środowiska naturalnego. Stało się ono tak powszechne, że w niektórych technologiach górniczych takich, jak: doszczelnianie zrobów zawałowych, likwidacja zbędnych wyrobisk czy też wykonywanie pasów podsadzkowych wręcz nieodzowne. Najczęściej popioły lotne wykorzystywane są w górnictwie w postaci mieszanin popiołowo-wodnych. Ilość powstających odpadów energetycznych skłania do poszukiwania nowych możliwości ich wykorzystywania, w tym również wytwarzanie nowych materiałów opartych na ich bazie, a co za tym idzie możliwości ich szerszego zastosowania np. do budowy barier izolacyjnych w składowiskach odpadów. Podstawowym warunkiem, jaki musi spełniać materiał stanowiący barierę izolacyjną, jest warunek szczelności. Szczelność scharakteryzowana jest poprzez współczynnik filtracji. Naturalne i antropogeniczne bariery ochronne powinny charakteryzować się wartościami współczynnika filtracji $k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s [8]. O wielkości współczynnika filtracji decyduje porowatość aktywna materiału, a więc pory o średnicy większej niż 0,2 μm .

W hydrogeologii przyjmuje się następujący podział porów [5]:

- ✧ nadkapilarne – o średnicy porów $d > 500 \mu\text{m}$, pozwalające wodzie na swobodne poruszanie się w nich pod wpływem działania siły ciężkości,
- ✧ kapilarne – o średnicy porów $500 \geq d > 0,2 \mu\text{m}$, umożliwiające wodzie jedynie ruchy kapilarne,
- ✧ subkapilarne – o średnicy porów $d \leq 0,2 \mu\text{m}$, w nich woda pod wpływem działania sił międzycząsteczkowych zostaje całkowicie związana i unieruchomiona.

W przypadku popiołów lotnych, które są materiałami mineralnymi drobnoziarnistymi, można przy charakterystyce przestrzeni porowej posłużyć się klasyfikacją obowiązującą dla gruntów i skał okruchowych [5, 7], którą przedstawiono w tabeli 1.

Badania porozymetryczne przeprowadzono metodą rtęciową za pomocą aparatu Auto Pore II 9220. Aparat umożliwia pomiar średnic porów w zakresie 0,003–300 μm . Posiada on 4 stacje niskociśnieniowe i 2 stacje wysokociśnieniowe, pracujące niezależnie. Stacje niskociśnieniowe funkcjonują w zakresie ciśnień od 0,0034 MPa do 0,2068 MPa, co umożliwia pomiar średnic porów od 300 μm do 6 μm . Natomiast stacje wysokociśnieniowe

TABELA 1. Klasyfikacja przestrzeni porowej w skałach okruchowych [5]

TABLE 1. Classification of pore spaces in aggregated rocks [5]

Rodzaj porów	Rodzaj porowatości	
Nadkapilarne $d > 500 \mu\text{m}$	Porowatość otwarta (n_o)	Porowatość aktywna
Kapilarne $500 \geq d > 0,2 \mu\text{m}$		(n_a)
Subkapilarne $d \leq 0,2 \mu\text{m}$		

mają możliwość pracy do 413,4 MPa, co rozszerza zakres pomiarowy średnic porów do 0,003 μm. Badania porozymetryczne obejmują określenie następujących wielkości:

- 1) całkowitą (skumulowaną) objętość porów (*TIV – Total Intrusion Volume*),
- 2) rozkład objętości porów (struktura porów),
- 3) całkowitą (skumulowaną) powierzchnię właściwą porów,
- 4) rozkład powierzchni właściwej porów (struktura powierzchni właściwej porów),
- 5) gęstość objętościową materiału,
- 6) gęstość właściwą materiału.

Otrzymane wielkości całkowitej (skumulowanej) objętości porów dla danych przedziałów średnic oraz gęstości objętościowej materiału pozwalają na obliczenie wielkości porowatości otwartej oraz aktywnej.

Badania laboratoryjne współczynnika filtracji ogólnie ze względu na charakter filtracji wody i zasadę działania dzielimy na stało- i zmiennogradientowe. Współczynnik filtracji można wyznaczać między innymi za pomocą permeametry Kamieńskiego (metoda zmiennogradientowa), kolumny filtracyjnej oraz metody ze stałym wydatkiem „Flow pump” (metoda stałogradientowa).

Pomiar współczynnika filtracji za pomocą kolumny filtracyjnej lub metody tzw. „Flow pump” jest dość skomplikowany i wymagający specjalistycznej aparatury. W metodzie stałogradientowej „Flow pump” mierzy się natężenia filtracji Q , różnicę ciśnienia h (ciśnienie różnicowe) oraz długość drogi filtracji l (długość próbki). Pozorny współczynnik filtracji (k_{poz}) oraz współczynnik filtracji (k) odpowiadający ustabilizowanej wartości różnicy ciśnień h oblicza się ze wzoru [1, 2]:

$$k = \frac{Q \cdot l}{F \cdot h} \text{ [cm/s]} \quad (1)$$

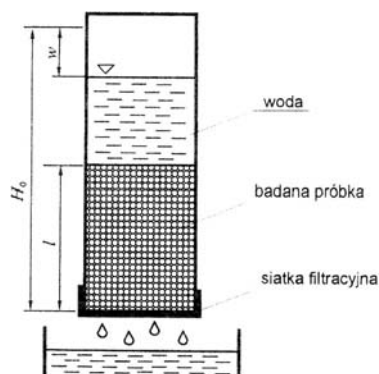
gdzie: l – wysokość próbki [cm],
 Q – wydatek pompy iniekccyjnej [cm³/s],
 F – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [cm²],
 h – różnica ciśnień [cm H₂O].

Natomiast w przypadku zmiennogradientowej metody permeametry Kamieńskiego (rys. 1), dokonuje się pomiaru tempa opadania zwierciadła wody. W miarę obniżania się poziomu wody w rurce zmniejsza się wysokość hydrauliczna, a wraz z nią prędkość przesączania wody.

Współczynnik filtracji oblicza się ze wzoru [3, 4, 6].

$$k = \frac{l}{t} \left[-\ln \left(1 - \frac{S}{h_o} \right) \right] \text{ [m/s]} \quad (2)$$

gdzie: k – współczynnik filtracji [m/s],
 l – długość próbki [m],
 h_o – początkowa wysokość poziomu wody [m],
 S – obniżenie zwierciadła wody w czasie t [m],
 t – czas pomiaru [s].



Rys. 1. Permeometr Kamińskiego ze swobodnym wypływem [3]

Fig. 1. Kamiński's permeameter with free output [3]

Permeometr Kamińskiego zapewnia łatwe oznaczenie współczynnika filtracji, lecz pomiar obarczony jest długim okresem badania, a także możliwością powstania błędu spowodowanego skurczem materiału – dotyczy to szczególnie materiałów zestalających. Dlatego też stosując tę metodę należy mieć pewność, że poddany badaniom materiał nie ulegnie procesowi skurczu. Tego typu zjawisko wyklucza np. metoda „Flow pump”. W metodzie tej próbka (walcowa) podczas badania umieszczana jest w komorze trójosiowej i zabezpieczana, przed cieczą wypełniającą komorę, płaszczem gumowym. Ciśnienie okólne powoduje szczelne przylgnięcie płaszcza do próbki, a tym samym eliminację przyściennego przepływu wody.

2. Charakterystyka materiału użytego do badań

Badania przeprowadzono dla popiołu o właściwościach wiążących, zawierającego produkty odsiarczania spalin pochodzące z El. „X”. Popiół lotny został zarobiony wodą wodociągową w proporcji w/p wynoszącej 0,467, co odpowiada rozlewności 183 mm.

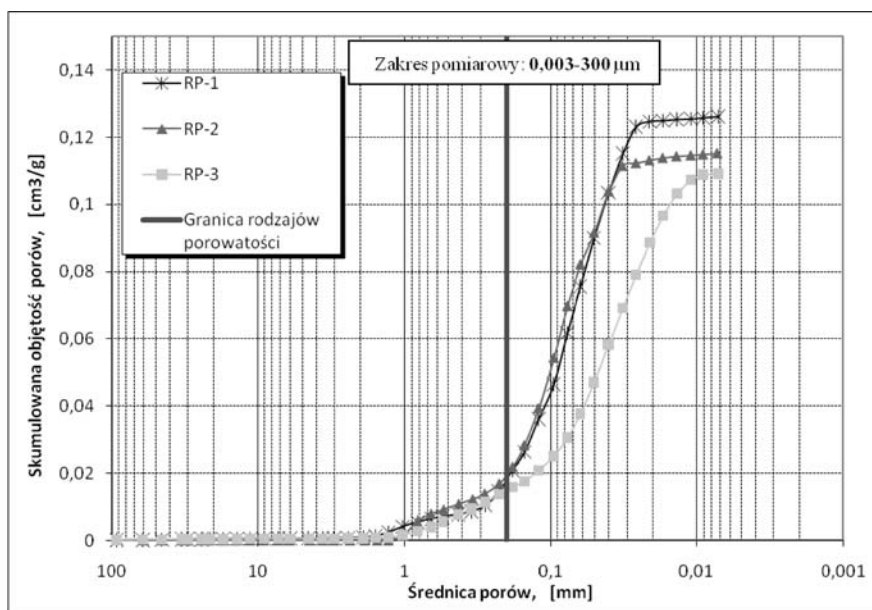
3. Wyniki i analiza badań porozymetrycznych

Badania porozymetryczne metodą rtęciową za pomocą aparatu AutoPore II 9220 przeprowadzono na 3 zestalonych próbkach hydromieszanki sezonowanych przez 360 dni w komorze klimatyzacyjnej. Wyniki badań porozymetrycznych zestalonych hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” przedstawiono w tabeli 2 oraz graficznie na rysunku 2.

TABELA 2. Wyniki badań porozymetrycznych zestalonej hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” (RP) w zakresie średnic porów 0,003–300 μm oraz 0,2–300 μm

TABLE 2. Results of porosimetric measurements of stabilized mixture of water and fly ash with desulphurization by-products from power plant “X” (RP), within range of pores diameter 0.003–300 μm and 0.2–300 μm

Nr próbki	Zakres średnic porów, d [mm]			
	0,003 < d < 300		0,2 < d < 300	
	gęstość objętościowa materiału μ_d [g/cm ³]	gęstość właściwa szkieletu materiału μ_s [g/cm ³]	porowatość otwarta n_o [%]	porowatość aktywna n_a [%]
RP-1	1,698	2,161	21,43	3,07
RP-2	1,759	2,207	20,27	3,38
RP-3	1,788	2,222	19,53	2,68
RP-średnia	1,749	2,197	20,41	3,04



Rys. 2. Skumulowana (całkowita) objętość porów w zakresie średnic 0,003–300 μm zestalonej hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X”

Fig 2. Cumulated (total) volume of pores within range of diameter 0.003–300 μm for stabilized mixture of fly ash with desulphurization by-products from power plant “X”

Zestawiona hydromieszanka popiołowa cechuje się średnią gęstością objętościową (r_d) wynoszącą $1,749 \text{ g/cm}^3$, przy średniej gęstości właściwej szkieletu (r_s) wynoszącej $2,197 \text{ g/cm}^3$. Porowatość otwarta (n_o) tego materiału wynosi średnio 20,41%. Natomiast porowatość aktywna (n_a) średnio wynosi 3,04%.

4. Wyniki i analiza badań współczynnika filtracji

Współczynnik filtracji (k) badanej hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” określono dwiema metodami:

- 1) metodą „Flow pump” – stałogradientową,
- 2) metodą permeametry Kamieńskiego – zmiennogradientową.

4.1. Metoda permeametry Kamieńskiego

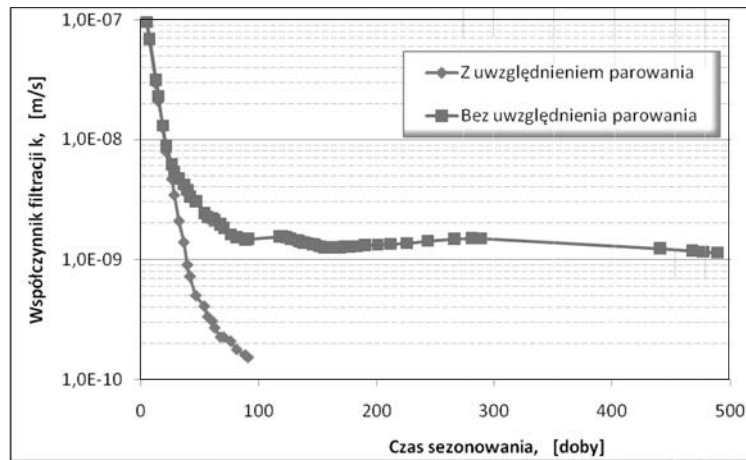
Uśrednione wyniki badań trzech oznaczeń współczynnika filtracji metodą permeametry Kamieńskiego hydromieszanki popiołowej przedstawiono w tabeli 3, a jego zmienność w czasie graficznie na rysunku 3.

Badana hydromieszanka po 91 dniach sezonowania, biorąc pod uwagę wpływ parowania wody, osiągnął współczynnik filtracji równy $1,55 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$. Dalsze pomiary wartości współczynnika filtracji z uwzględnieniem parowania wody stały się dla tego materiału niemożliwe. Spowodowane jest to zbyt małą dokładnością wykonywania odczytów obniżających się zwierciadeł wody. Zaniedbując parowanie wody badana hydromieszanka po 91 dniach sezonowania osiągnęła współczynnik filtracji wynoszący $1,50 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, a po 488 dniach równą $1,15 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$.

TABELA 3. Uśrednione wyniki badań współczynnika filtracji określonego metodą permeametry Kamieńskiego hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” (RP)

TABLE 3. Results of coefficient of filtration measurements with use of Kamienski's permeameter for stabilized mixture of water and fly ash with desulphurization by-products from power plant "X" (RP)

Rodzaj popiołu (oznaczenie)	Czas sezonowania [doby]	Współczynnik filtracji (z uwzględnieniem parowania) [m/s]	Współczynnik filtracji (bez uwzględnienia parowania) [m/s]
RP	91	$1,55 \cdot 10^{-10}$	$1,50 \cdot 10^{-9}$
RP	488	brak możliwości określenia wynikający z dokładności wykonywania odczytów (przypuszczalne $\sim 1,00 \cdot 10^{-10}$)	$1,15 \cdot 10^{-9}$



Rys. 3. Zmienność współczynnika filtracji w czasie hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X”

Fig 3. Variability of filtration coefficient value for stabilized mixture of fly ash with desulphurization by-products from power plant “X”

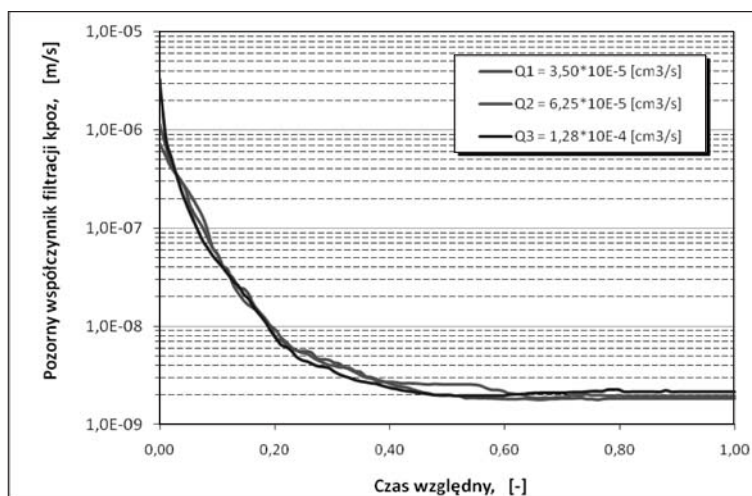
TABELA 4. Wyniki badań współczynnika filtracji określonego metodą „Flow pump” hydromieszanki popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” (RP)

TABLE 4. Results of coefficient of filtration measurements with use of Flow pump for stabilized mixture of water and fly ash with desulphurization by-products from power plant “X” (RP)

Oznaczenie próbki	Wysokość próbki l [cm]	Powierzchnia przekroju poprzecznego próbki F [cm ²]	Wydatek pompy infuzyjnej Q _(1,2,3) [cm ³ /s]	Współczynnik filtracji dla danego wydatku Q k _Q [m/s]	Średni współczynnik filtracji dla danej próbki k _i [m/s]	Średni współczynnik filtracji dla badanego popiołu k [m/s]
RP-1	4,19	13,58	3,50 · 10 ⁻⁵	1,84 · 10 ⁻⁹	1,98 · 10 ⁻⁹	1,81 · 10 ⁻⁹
			6,25 · 10 ⁻⁵	1,96 · 10 ⁻⁹		
			1,28 · 10 ⁻⁴	2,14 · 10 ⁻⁹		
RP-2	4,20	13,72	3,50 · 10 ⁻⁵	2,16 · 10 ⁻⁹	2,25 · 10 ⁻⁹	
			6,25 · 10 ⁻⁵	2,22 · 10 ⁻⁹		
			1,28 · 10 ⁻⁴	2,35 · 10 ⁻⁹		
RP-3	4,19	13,77	3,50 · 10 ⁻⁵	9,69 · 10 ⁻¹⁰	1,19 · 10 ⁻⁹	
			6,25 · 10 ⁻⁵	1,14 · 10 ⁻⁹		
			1,28 · 10 ⁻⁴	1,46 · 10 ⁻⁹		

4.2. Metoda „Flow pump”

Badania współczynnika filtracji metodą „Flow pump” przeprowadzono na 3 zestalonych próbkach hydromieszaniny sezonowanych przez 270 dni w komorze klimatyzacyjnej. Wyniki badań współczynnika filtracji zestalonych hydromieszanin popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” przedstawiono w tabeli 4. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wykres zmienności współczynnika filtracji w funkcji czasu względnego próbki RP-1.



Rys. 4. Zmiana współczynnika filtracji (k_{poz}) w funkcji czasu względnego przy różnych wydatkach przepływu (Q) dla próbki RP-1

Fig 4. Change of filtration coefficient (k_{poz}) in relation to relative time for different flow rates (Q) during the testing of RP-1 sample

Badana hydromieszanina popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” charakteryzuje się średnim współczynnikiem filtracji, określonym metodą „Flow pump”, wynoszącym $1,81 \cdot 10^{-9}$ m/s. Wartość uzyskanego współczynnika filtracji metodą „Flow pump” odpowiada wartości uzyskanej metodą permeametry Kamieńskiego, ale bez uwzględnienia parowania i o około 1 rząd większą uwzględniając parowanie. Należy nadmienić, że badana próbka w metodzie Kamieńskiego miała długość około 42 cm, a więc około 10 razy większą niż próbki stosowane w metodzie „Flow pump”. Średnica badanych próbek w obu metodach była podobna. Możliwość stosowania dowolnej średnicy i długości próbki jest niewątpliwą zaletą metody permeametry Kamieńskiego.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Porowatość otwarta (n_o) zestalonych hydromieszanin popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” wynosi średnio 20,41%, a porowatość aktywna (n_a) średnio 3,04%. O porowatości otwartej n_o zestalonej hydromieszaniny popiołu decydują pory subkapilarne generalnie w zakresie średnic 0,01–0,1 μm . Natomiast współczynnik filtracji omawianego materiału w zależności od metody badawczej wyniósł $1,55 \cdot 10^{-10}$ m/s dla permeamtru Kamieńskiego oraz $1,81 \cdot 10^{-9}$ m/s dla „Flow pump”.

Uzyskane wartości właściwości porozymetrycznych oraz bardzo niski współczynnik filtracji zestalonej hydromieszaniny popiołu z produktami odsiarczania spalin z El. „X” świadczą o możliwości stosowania tego typu popiołu w różnego rodzaju technologiach związanych z izolowaniem obiektów np. przy wykonywaniu:

- ✧ różnego rodzaju barier izolacyjnych, w tym również w składowiskach,
- ✧ korków izolacyjnych,
- ✧ pasów izolacyjnych,
- ✧ torkretów uszczelniających.

Literatura

- [1] MARCINIAK M., PRZYBYŁEK J., HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J., 1999 – Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. Wyd. Sorus, Poznań-Kraków;
- [2] MARCINIAK M., PRZYBYŁEK J., HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J., 1998 – Laboratoryjne i terenowe oznaczanie współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. Instrukcja. Wyd. Sorus, Poznań
- [3] PALARSKI J., PLEWA F., BABCZYŃSKI W., 2002 – Modelowanie migracji zanieczyszczeń z poziomych składowisk odpadów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [4] PLEWA F., MYSŁEK Z., 2003 – Wpływ dodatków modyfikujących na wodoprzepuszczalność mieszanin popiołowo-wodnych. ZN Pol. Śl., nr 258, Gliwice.
- [5] PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- [6] ROGOŹ M., i in., 1986 – Poradnik hydrogeologa w kopalni węgla kamiennego. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- [7] SZTELAK T., 1987 – Hydrogeologia górnicza i sposoby zwalczania zagrożeń wodnych w kopalniach podziemnych. Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1343, Gliwice.
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz.U. Nr 61, poz. 549 z dnia 24 marca 2003 r.).

Franciszek PLEWA, Piotr PIERZYNA, Jerzy KANAFEK

Assessment of porosimetric and filter properties of fly-ashes hydromixtures for construction of isolation barriers in underground waste disposal sites

Abstract

The most important requirement, which must be met by a material for an isolation barrier is its permeability. Permeability is characterized by filtration coefficient, which value must be not higher than $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Active porosity of a material decides on the value of filtration coefficient that means pores of diameter larger than 0.2 μm . Open porosity (n_o) of stabilized mixtures of fly ash with desulphurization by-products from power plant "X" and water is equal in average to 20.41%, and its active porosity (n_a) 3.04% (see Table 2 and Fig. 2). Open porosity n_0 regards on sub-capillary pores in a range of diameter 0.01–0.1 μm . Filtration coefficient measured for discussed material equals, in relation to a method used, $1.55 \cdot 10^{-10}$ m/s for Kamienski permeameter and $1.81 \cdot 10^{-9}$ m/s for the flow pump method (see Table 3 and Figures 3 and 4).

Obtained values of porosimetric properties and low filtration coefficient of mixture of fly ash with desulphurization by-products from "X" power plant prove positively on ability to use of this type of fly in different technologies related to isolation of structures, i.e. isolation barriers for underground waste disposal sites, sealing plugs and dams, shotcreted, etc.

KEY WORDS: mining, coal combustion by-products, isolation barriers, waste disposal sites, filtration and porosimetric properties