



Analiza współczynnika filtracji w aspekcie możliwości stosowania alternatywnych materiałów do budowy barier izolacyjnych na składowiskach odpadów

Jolanta Sobik-Szołtysek, January B. Bień, Marcin Milczarek
Politechnika Częstochowska

1. Wstęp

Dla większości rodzajów powstających odpadów podstawowym sposobem ich zagospodarowania pozostaje nadal składowanie w środowisku. Odpady zdeponowane w miejscu składowania, w zależności od ich składu chemicznego i mineralnego, podlegają w wyniku reakcji z elementami środowiska różnym przeobrażeniom, co powoduje powstanie kolejnych, wtórnych zanieczyszczeń. Substancje te, migrując poza składowisko, stanowią potencjalne i realne zagrożenie dla gleb oraz wód gruntowych i podziemnych w otoczeniu miejsca depozycji.

Akty prawne obowiązujące w zakresie ochrony środowiska, a w szczególności dotyczące budowy i eksploatacji składowisk odpadów [20, 16] narzucają obowiązek stosowania odpowiednich zabezpieczeń w postaci uszczelnień, uniemożliwiających przedostanie się zanieczyszczeń do środowiska gruntowo-wodnego. Ma to szczególne znaczenie w świetle malejących zasobów wodnych kraju i wysokiego stopnia narażenia wód podziemnych na zanieczyszczenia. W przypadku braku wystarczająco szczelnej, naturalnej bariery geologicznej, teren składowiska należy zabezpieczyć poprzez wykonanie uszczelnień w postaci przesłon (barier izolacyjnych). Przesłony te mogą posiadać charakter mineralny lub mineralno-syntetyczny. Najodpowiedniejszym surowcem do ich budowy są kopaliny ilaste, charakteryzujące się niskim współczynnikiem

filtracji oraz dużą pojemnością sorpcyjną, pozwalającą na „przechwylenie” jak największej ilości zanieczyszczeń migrujących z wodami odciekowymi.

Wykorzystanie do budowy barier izolacyjnych naturalnych surowców mineralnych (kopalin ilastych o charakterze glin lub łąów) wymaga ich pozyskiwania z lokalnych złóż, co nieuchronnie powoduje generowanie odpadów pochodzących z procesów wydobywania i uzdatniania kopaliny, zmianę stosunków wodnych i jakości gleb w otoczeniu wyrobisk, degradację krajobrazu oraz dodatkowe koszty, w tym energii i badań przydatności surowca. Celowym zatem wydaje się poszukiwanie materiałów zastępczych, mogących konkurować z surowcami naturalnym zarówno pod względem technologicznym, jak i ekonomicznym. Najwłaściwszą alternatywę dla kopalin ilastych mogą stanowić drobnoziarniste odpady przemysłowe o charakterze mineralnym. Zastosowanie takich materiałów redukuje ich ilość deponowaną na składowiskach, a powstającą w bieżących procesach przemysłowych oraz pozwala na wykorzystanie odpadów zdeponowanych wcześniej, co zmniejsza ich uciążliwość dla środowiska. W ten sposób zapewniona jest również ochrona złóż kopalin naturalnych. Badania w tym zakresie prowadzone są w wielu ośrodkach naukowych na świecie, a od początku lat dziewięćdziesiątych ub. wieku także w Polsce, między innymi w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Częstochowskiej. Potwierdziły one przydatność do budowy barier izolacyjnych popiołów pochodzących ze spalania paliw stałych [11, 13–15, 23], mułów węglowych z procesów wzbogacania węgla kamiennych [8, 1, 2] oraz odpadów poflotacyjnych z procesów wzbogacania rud Zn-Pb [6, 18]. Wszystkie te grupy materiałów w Polsce generowane były lub są w masowych ilościach przez przemysł wydobywczy i energetyczny [7, 9, 19]. Dotychczasowy kierunek badań skupiał się na indywidualnym wykorzystaniu każdego z analizowanych materiałów w aspekcie wykorzystania ich właściwości izolacyjnych lub zastosowania go jedynie jako domieszki do naturalnych materiałów mineralnych [4, 5, 21, 24]. Nowe spojrzenie na problem znalezienia alternatywnych w stosunku do kopalin ilastych materiałów do budowy barier izolacyjnych na składowiskach polega na próbie uzyskania optymalnej mieszanki mineralnych materiałów odpadowych lub będących ubocznym produktem działalności przemysłowej o synergicznych parametrach, szczególnie filtracyjnych i sorpcyjnych. Nie do pominięcia jest również

fakt wejścia w życie przepisów umożliwiających zamykanie z urzędu składowisk nie spełniających wymagań prawnych i technologicznych, w tym w zakresie braku zabezpieczeń środowiska gruntowo-wodnego. Wygeneruje to z pewnością konieczność budowy nowych, w pełni zabezpieczonych obiektów, a co za tym idzie intensyfikację działań mających na celu pozyskiwanie materiału do budowy barier izolacyjnych.

Podstawowym parametrem bariery izolacyjnej, zapewniającym jej skuteczność w zakresie blokady migracji zanieczyszczeń poza składowisko, jest odpowiednia wartość współczynnika filtracji, która zgodnie z wymogami prawa [16] nie może być większa od 10^{-9} m/s. Celem prezentowanych badań była analiza współczynnika filtracji uzyskiwanego przez zaproponowane mieszanki sporządzone z drobnoziarnistych odpadów mineralnych i ubocznych produktów działalności przemysłowej w warunkach ich maksymalnego zagęszczenia, dla wytypowania najskuteczniejszego pod względem szczelności materiału do budowy barier izolacyjnych na składowiskach odpadów.

2. Metodyka badań

2.1. Substraty do badań

Na podstawie prowadzonych wcześniej badań w zakresie możliwości wykorzystania drobnoziarnistych odpadów mineralnych do budowy uszczelnień do sporządzenia mieszanin wytypowano następujące ich rodzaje:

- muł węglowy oznaczony jako **M**, pobrany z pras filtracyjnych Zakładu Górniczego „Sobieski” w Jaworznie, wchodzącego w skład Południowego Koncernu Węglowego S.A.;
- popioły, tj. uboczne produkty spalania (UPS), powstające w energetyce zawodowej podczas spalania węgla kamiennego i brunatnego w kotłach konwencjonalnych i fluidalnych, oznaczone jako: **PB** – popiół lotny ze spalania węgla brunatnego z Elektrowni „Bełchatów”, **PK** – popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych, pobrany z Elektrowni „Łagisza” w Będzinie, **PL** – popiół lotny ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych, pobrany z Elektrowni „Łagisza” w Będzinie, **PD** – popiół denny ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych, pobrany z Elektrowni „Łagisza” w Będzinie;

- odpady poflotacyjne z przerobu rud Zn-Pb z nieczynnego osadnika w rejonie Bytomia, oznaczone jako **OF**;
- ility nadkładowe ze złoża węgla brunatnego „Bełchatów”, oznaczone jako **I**.

Po pobraniu materiały wysuszono do stanu powietrzno-suchego, a następnie sporządzono z nich 8 mieszanek ze zmiennym udziałem poszczególnych komponentów, w których głównym składnikiem matrycy w udziale 50% wag. były muły węglowe. Do badań przygotowano próbki reprezentatywne metodą kwartowania. Zastosowane proporcje w mieszanekach oraz ich oznaczenia przedstawiono w tabeli 1 wg opisu jak wyżej.

Tabela 1. Skład badanych mieszanek
Table 1. Composition of the mixtures studied

Oznaczenie mieszanek	Udział składnika mieszanek [% wag.]						
	M	PB	PK	PL	PD	OF	I
MPB	50	50	–	–	–	–	–
MPK	50	–	50	–	–	–	–
MPL	50	–	–	50	–	–	–
MPD	50	–	–	–	50	–	–
MPBOF	50	40	–	–	–	10	–
MPBI	50	40	–	–	–	–	10
MPLOF	50	–	–	40	–	10	–
MPLI	50	–	–	40	–	–	10

2.2. Przebieg badań

Maksymalne zagęszczenie materiału mineralnego w technologiach ich wbudowywania w bariery izolacyjne uzyskuje się w warunkach tzw. *wilgotności optymalnej* ($w_{opt.}$). Powoduje ona wzrost odporności wykładziny gruntowej na działanie sił ścinających oraz stabilizuje ją. Maksymalne zagęszczenie zapewnia spadek porowatości efektywnej, a tym samym spadek przepuszczalności hydraulicznej materiału, co jest efektem oczekiwanym. Dla wyznaczenia wilgotności optymalnej mieszanek w pierwszym etapie wykonano badania zmian stopnia zagęszczenia przy zmiennej zawartości wody zgodnie z normą [10] metodą za-

gęszczania w aparacie Proctora. Zastosowano metodę [12], której parametry przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry metody wyznaczania wilgotności optymalnej

Table 2. Parameters of the method of determination of optimum humidity

Cylinder	Rodzaj ubijaka	Liczba wkładanych warstw	Liczba uderzeń	Wysokość opuszczania ubijaka [cm]	Jednostkowa energia zagęszczenia [J/cm ³]
mały	lekki	3	25	32,0	0,6

Na podstawie uzyskanej w trakcie zagęszczania wartości gęstości objętościowej gruntu ρ , obliczono gęstość objętościową szkieletu gruntowego ρ_{ds} .

$$\rho_{ds} = \frac{\rho \cdot 100}{100 + w} \quad (1)$$

gdzie:

ρ_{ds} – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, Mg/m³

ρ – gęstość objętościowa gruntu, Mg/m³

w – wilgotność, %

Wartość wilgotności optymalnej określono na podstawie sporządzonych wykresów zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności.

Kolejnym etapem badań było oznaczenie dla każdej mieszanki w warunkach określonej dla niej wilgotności optymalnej współczynnika filtracji metodą zalecaną przez Instytut Techniki Budowlanej dla gruntów drobnoziarnistych [22]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska do badania filtracji w warunkach przepływu cieczy od dołu do góry próbki, przy zmiennym spadku hydraulicznym z zachowaniem jego wartości minimalnej $I > 30$. Do badań przepływu użyto wody dejonizowanej. Zmiany wysokości słupa wody w rurce piezometrycznej odczytywano co 24 godziny w ciągu 30 kolejnych dni, dokonując jednocześnie pomiaru temperatury filtratu.

Na podstawie dobowych odczytów obliczono współczynnik filtracji k .

$$K = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji, m/s

a – pole przekroju rurki piezometrycznej, m²

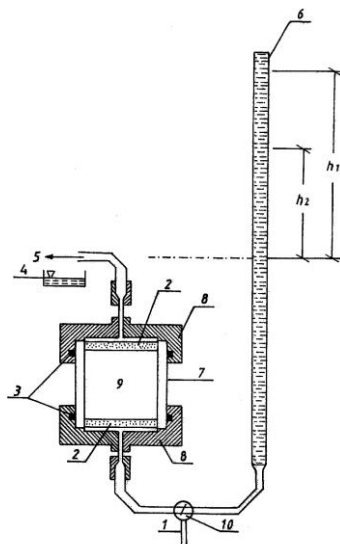
l – wysokość próbki, m

A – pole przekroju próbki, m²

t – czas badania, s

h_1 – wysokość słupa wody na początku badania, m

h_2 – wysokość słupa wody na końcu badania, m



Rys. 1. Schemat stanowiska do badania filtracji wg [22]; 1 – dopływ wody, 2 – podkładka porowata, 3 – uszczelka, 4 – pomiar odpływu, 5 – odpływ, 6 – rurka piezometryczna z podziałką w cm³, 7 – obudowa cylindra, 8 – głowica, 9 – próbka mieszanki, 10 – zawór przelotowy

Fig. 1. Diagram of the stand for filtration with water feed from the bottom according to [22]; 1 – water inlet, 2 – porous washer, 3 – sealing, 4 – outlet measurement, 5 – outlet, 6 – piezometric level, 7 – cylinder casing, 8 – head, 9 – mixture sample, 10 – straight through valve

Wyliczone wartości współczynnika filtracji przeliczono zgodnie z poprawką temperaturową w odniesieniu do temperatury wody 10°C.

$$k_{10} = \frac{1,359 \cdot k}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (3)$$

gdzie:

k_{10} – współczynnik filtracji dla temperatury 10°C, m/s

T – średnia temperatura w trakcie badania, °C

W trakcie przeprowadzania badań dokonywano również w cyklach tygodniowych poboru prób przesączonego przez próbkę filtratu. Dla próbek oznaczano wartość pH oraz przewodność dla określenia stopnia mineralizacji. Pomiarów dokonywano za pomocą wielofunkcyjnego miernika firmy HANNA INSTRUMENTS model HI9828.

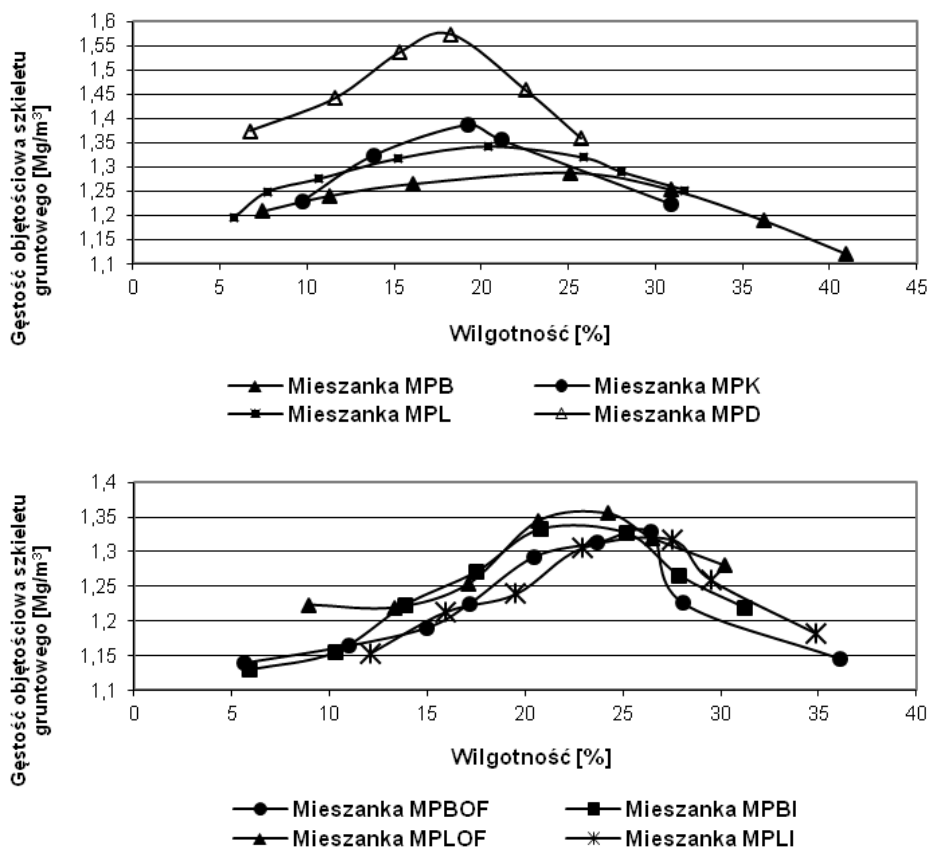
3. Wyniki badań i ich omówienie

Na podstawie wykresów ilustrujących zależność gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności (rys. 2) wyznaczono wartość wilgotności optymalnej w_{opt} oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego dla każdej mieszanki. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Uzyskane dla mieszanek wartości wilgotności optymalnej oraz zależnych od niej parametrów

Table 3. Values of optimum humidity and the related parameters obtained for the mixtures

Rodzaj mieszanki	Wyznaczony parametr		
	Wilgotność optymalna w_{opt} , [%]	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{dmax} , [Mg/m ³]	Wskaźnik zagęszczenia I_s
MPB	25,09	1,288	1,251
MPK	19,24	1,387	1,193
MPL	20,43	1,343	1,204
MPD	18,26	1,574	1,182
MPBOF	26,43	1,328	1,264
MPBI	20,83	1,333	1,209
MPLOF	24,21	1,356	1,242
MPLI	27,50	1,318	1,275



Rys. 2. Zależność gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności
Fig. 2. Relationship between bulk density of soil matrix and humidity

Dla większości mieszanek wilgotność optymalna zawierała się w przedziale 20–27,5%, natomiast w przypadku mieszanek z udziałem popiołu dennego z kotłów fluidalnych oraz popiołu lotnego z kotła konwencjonalnego była <20%. Największą wartość wilgotności optymalnej uzyskano dla mieszanek trójskładnikowych MPBOF i MPLI. Jest to prawdopodobnie związane z większą wodochłonnością tych mieszanek spowodowaną obecnością w ich składzie CaO. Cechą charakterystyczną popiołów ze spalania węgla brunatnego jest bowiem podwyższona zawartość związków wapnia w stosunku do popiołów ze spalania węgla kamiennych. W przypadku mieszanki MPLI jej większe „zapotrzebowanie” na wodę dla uzyskania maksymalnego zagęszczenia spowodowane

jest tym, że popioły lotne ze spalania w kotłach fluidalnych wzbogacone są w wolny tlenek wapnia, pochodzący z sorbentów stosowanych w tych technologiach do odsiarczania spalin.

Uzyskany w warunkach laboratoryjnych dla wszystkich mieszanek bardzo wysoki wskaźnik zagęszczenia, przekraczający $I_s = 1$ o ok. 20%, pozwala wnioskować, że możliwe jest uzyskanie podłoża zaliczonego do gruntów bardzo zagęszczonych z zachowaniem wysokiego marginesu bezpieczeństwa w sytuacji formowania takiego podłoża w warunkach polowych.

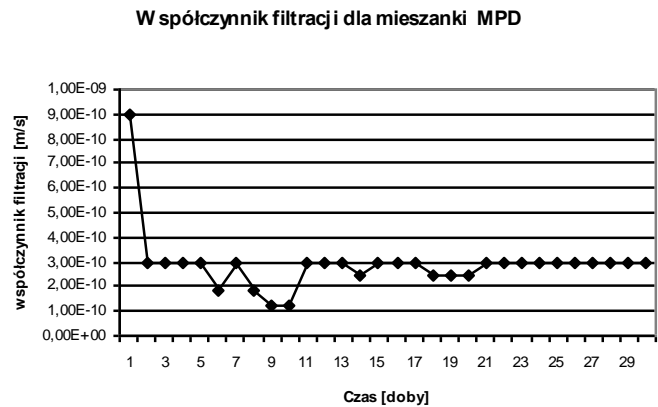
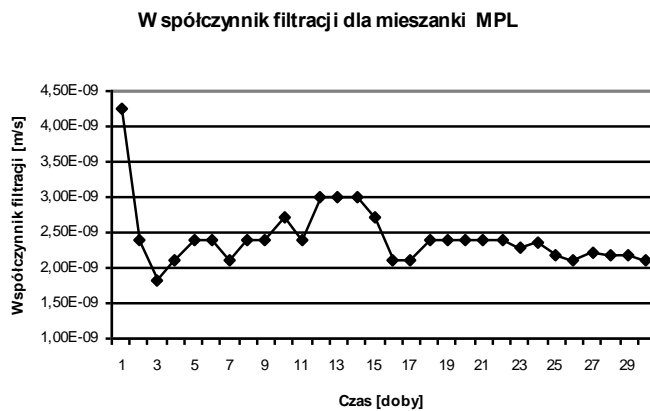
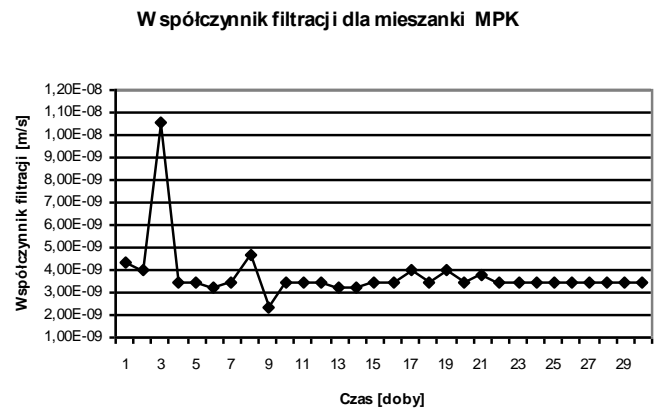
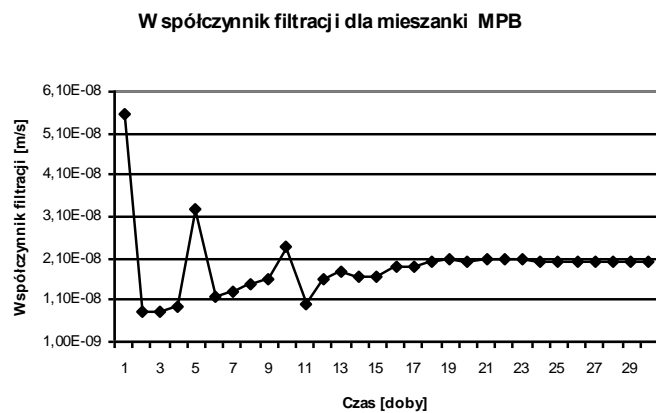
Rysunek 3 przedstawia zmienność współczynnika filtracji k_{10} w trakcie 30-dniowego cyklu badawczego dla poszczególnych mieszanek.

Zaobserwowano stabilizację wartości współczynnika filtracji k_{10} większości mieszanek po około 10–11 dobach od rozpoczęcia doświadczenia, na poziomie charakterystycznym dla danej mieszanki. Tabela 3 przedstawia średnie, ustabilizowane po 30 dniach współczynniki filtracji badanych mieszanek.

Tabela 3. Średni ustabilizowany współczynnik filtracji

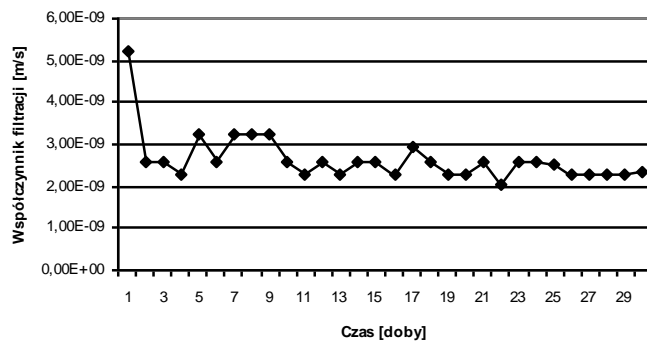
Table 3. Mean stabilized filtration coefficients

Rodzaj mieszanki	Ustabilizowany współczynnik filtracji k_{10} [m/s]
MPB	$2,03 \cdot 10^{-8}$
MPK	$3,46 \cdot 10^{-9}$
MPL	$2,16 \cdot 10^{-9}$
MPD	$3,0 \cdot 10^{-10}$
MPBOF	$2,27 \cdot 10^{-9}$
MPBI	$1,62 \cdot 10^{-9}$
MPLOF	$3,73 \cdot 10^{-9}$
MPLI	$6,32 \cdot 10^{-10}$

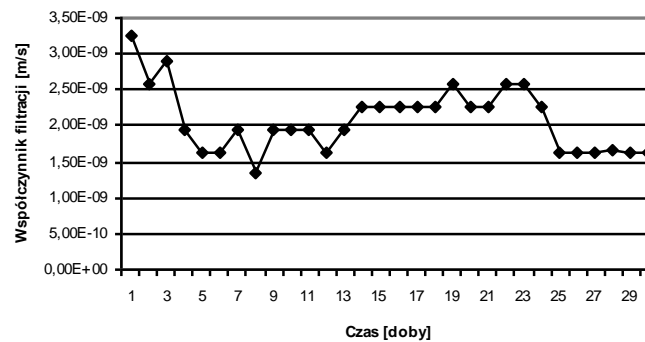


Rys. 3. Zmienność współczynnika filtracji w funkcji czasu
Fig. 3. Variability of filtration coefficient as a function of time

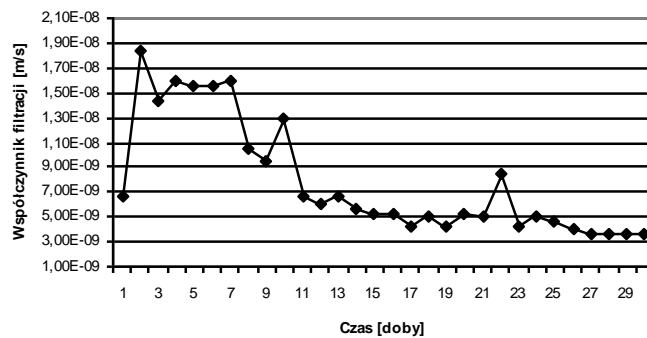
Współczynnik filtracji dla mieszanki MPBOF



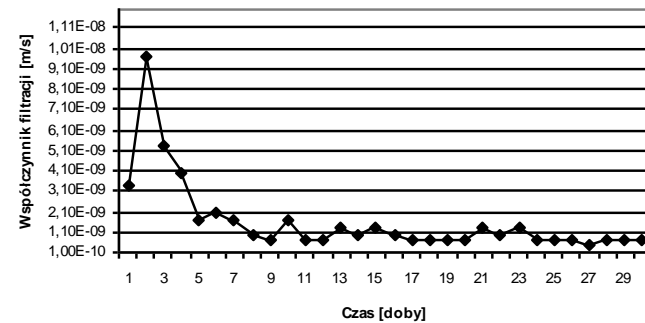
Współczynnik filtracji dla mieszanki MPBI



Współczynnik filtracji dla mieszanki MPLOF



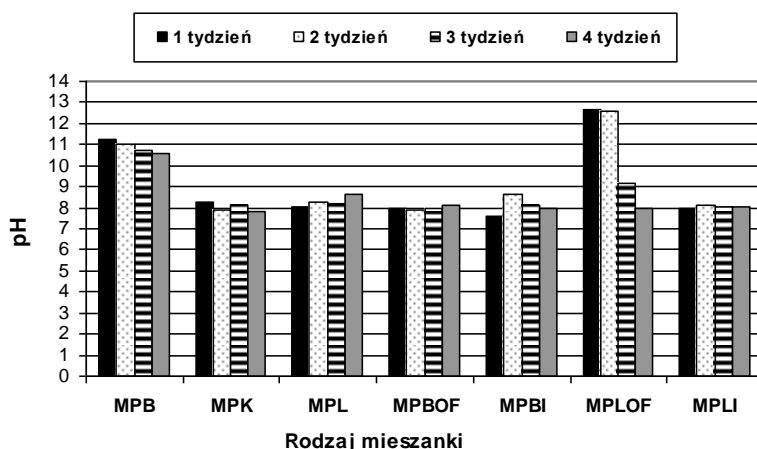
Współczynnik filtracji dla mieszanki MPLI



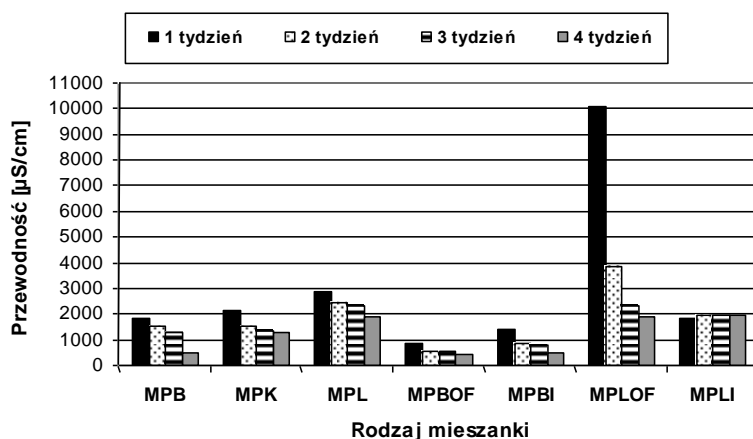
Rys. 3. cd
Fig. 3. cont.

Najwyższy, ustabilizowany współczynnik filtracji rzędu $2 \cdot 10^{-8}$ m/s posiada mieszanka mułów węglowych z popiołami ze spalania węgla brunatnego MPB, co dyskwalifikuje ją do zaproponowanego wykorzystania. Niemniej zastosowanie kolejnego dodatku do tej mieszanki (odpadów floacyjnych lub ilów) zdecydowanie poprawia współczynnik filtracji, który osiąga wartość odpowiednio $2,27 \cdot 10^{-9}$ m/s dla MPBOF i $1,62 \cdot 10^{-9}$ m/s dla MPBI. Najkorzystniejszy współczynnik osiągnęły mieszanki mułu węglowego z popiołami ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych, w tym modyfikowane dodatkiem ilów. Wartość współczynnika filtracji mieściła się w zakresie $3-6,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Dodatek 10% ilów do mieszanki MPL spowodował poprawę współczynnika filtracji do wartości oczekiwanej. W pozostałych mieszankach osiągnięto współczynniki filtracji rzędu 10^{-9} , lecz na poziomie większym od wymaganego przepisami [16] tj. minimum $k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Zastosowanie w prowadzonych badaniach, z uwagi na ewentualne przyszłe wykorzystanie rozwiązania w praktyce, udziału masowego, a nie jak w badaniach dotychczas prowadzonych objętościowego, poszczególnych składników mieszanek, spowodowało uzyskanie nieco odmiennych (gorszych) parametrów filtracyjnych materiału. Związane to jest ze zróżnicowanym, zmiennym ciężarem poszczególnych składników mieszanek. Jednakże wyniki wcześniej prowadzonych w tym zakresie badań [1–3] wykazały, że zwiększanie udziału mułów w mieszankach poprawia ich właściwości uszczelniające, głównie z uwagi na obecność w mule węglowym minerałów ilastych.

W celu przeanalizowania zmian zachodzących w roztworach filtrujących przez poszczególne mieszanki, w cyklach tygodniowych oznaczono w przesączu jego pH oraz przewodność, która określa stopień mineralizacji, a tym samym zanieczyszczenie wód. Wyjątek stanowi mieszanka MPD, dla której nie uzyskano filtratu w ilości wystarczającej do przeprowadzenia analizy z uwagi na zwiększone parowanie w trakcie prowadzenia badań – badania prowadzono w miesiącu sierpniu. Uzyskane rezultaty analizy pH i przewodności przedstawiono na rys.4 i 5. Zaobserwowano, że we wszystkich filtratach, za wyjątkiem filtratu z MPB, po 4 tygodniach pH ustabilizowało się na poziomie nie przekraczającym dopuszczalnego zgodnie z [17]. Wysokim pH na poziomie 10,5–11,2 cechował się filtrat z mieszanki MPB, co związane jest z dużą zawartością CaO w węglu brunatnym ze złoża Bełchatów, zwiększającą zdecydowanie alkaliczność roztworu. Największy spadek pH z 12,6 do ok. 8 odnotowano w filtracie z mieszanki MPLOF.



Rys. 4. Zmiana pH filtratów odbieranych w cyklach tygodniowych
Fig. 4. Changes in pH filtrates collected on weekly basis



Rys. 5. Zmiana przewodności filtratów odbieranych w cyklach tygodniowych
Fig. 5. Changes in conductivity of the filtrates collected on weekly basis

Za wyjątkiem mieszanki MPLI we wszystkich filtratach odnotowano spadek przewodności w czasie. Tylko filtraty z mieszanek sporządzonych z udziałem popiołów ze spalania węgla brunatnego spełniają oczekiwania rozporządzenia w tym zakresie [17]. Większa mineralizacja filtratów z pozostałych mieszanek jest spowodowana podwyższoną zawartością w nich substancji rozpuszczalnych, których ilość z czasem będzie malała. Należy zatem oczekiwać utrzymania się tendencji spad-

kowej dla tego parametru. Spadek mineralizacji spowodowany może być procesami wytrącania się substancji mineralnych w przestrzeni porów, szczególnie w przypadku obecności w mieszkach drobnoziarnistego materiału, w którym powierzchnia kontaktu ziaren i roztworu jest duża. Stopniowa krystalizacja w obrębie przestrzeni porów powoduje ich częściowe lub całkowite zamykanie, co polepsza właściwości uszczelniające materiału. Znajduje to potwierdzenie w pokazanym na rys. 3 spadku prędkości filtracji w czasie.

4. Wnioski

Oczekiwaną wartość współczynnika filtracji osiągnięto tylko dla dwóch mieszanek, tj. MPD i MPLI. W trakcie badań stwierdzono, że tworzenie trójskładnikowych mieszanek w każdym przypadku obniżyło współczynnik filtracji. Szczególnie uwidoczniło się to przy stosowaniu popiołów ze spalania węgla brunatnego, przy czym dodatek odpadów flotacyjnych poprawił ten parametr w stopniu mniejszym niż dodatek iłów nadkładowych. W przypadku mieszaniny MPL dodatek iłów spowodował najistotniejszą poprawę współczynnika filtracji. Biorąc pod uwagę wyniki wcześniejszych badań zastosowania do budowy barier izolacyjnych mułów węglowych oraz UPS, zwiększenie udziału mułów w mieszkach pozwoli na osiągnięcie oczekiwanej wielkości parametru k , zwłaszcza dla mieszanek, gdzie jego wartość kształtuje się blisko granicznych wartości dopuszczalnych.

W badaniach przeanalizowano współczynnik filtracji jako jedyny parametr, którego wielkość jest określona przepisami. Jednak materiały proponowane do budowy barier izolacyjnych powinny posiadać również odpowiednie właściwości technologiczne, takie jak łatwość formowania, podatność na odkształcenia, odpowiednią spójność i wytrzymałość na ścinanie. Ważnym z punktu widzenia ochrony środowiska gruntowo-wodnego są zdolności sorpcyjne tych materiałów. Należy zatem zaproponowane mieszanki przeanalizować w tym aspekcie, a otrzymane wyniki skorelować z uzyskanymi w trakcie dotychczasowych badań.

Zastosowanie do konstrukcji barier izolacyjnych materiałów odpadowych oraz ubocznych produktów działalności przemysłowej jest uzasadnione zarówno z punktu widzenia ekonomii, jak i ekologii. Niemniej z uwagi na częsty brak stabilnego składu tych materiałów, każdorazowo przed próbą ich zastosowania należy dokonać oceny przydatności uwzględniając aktualne ich właściwości.

*Badania realizowano w ramach projektu badawczego własnego
Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N506 157940*

Literatura

1. **Doniecki T., Girczys J., Sobik-Szołtysek J.:** *Ocena zastosowania drobnoziarnistych odpadów górnictwa w budowie barier izolacyjnych.* Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, monografia nr 149, seria Inżynieria Środowiska, Koszalin, 167–179 (2008).
2. **Doniecki T., Siedlecka E.:** *Zmienność współczynnika filtracji w mule węglowym proponowanym do budowy barier izolacyjnych.* Inżynieria i Ochrona Środowiska, t.12, nr 3, 219–230 (2009).
3. **Doniecki T.:** *Ocena przydatności popiołów lotnych i dennych z kotła fluidalnego do budowy barier izolacyjnych.* Zrównoważona Produkcja i Konsumpcja Surowców Mineralnych, Wydawnictwa Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 155–166 (2011).
4. **Filipowicz P., Borys M.:** *Wykorzystanie odpadów przemysłowych do budowy i wzmacniania wałów przeciwpowodziowych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 10, 633–644 (2008).
5. **Folek S., Rokita J., Miśkiewicz J.:** *Sposób wykonywania uszczelnienia podłoża składowiska odkrytego, zwłaszcza dla odpadów komunalnych lub przemysłowych.* Patent nr 200216, 2004.
6. **Girczys J., Sobik-Szołtysek J., Skrzypczyk H., Dąbrowicz W.:** *Sposób budowy składowisk dla odpadów zawierających metale ciężkie.* Patent nr 186766, 2007.
7. **Girczys J., Sobik-Szołtysek J.:** *Odpady przemysłu cynkowo-olowiowego.* Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, seria monografie nr 87, Częstochowa, 2002.
8. **Girczys J.:** *Odpadowe muły węglowe.* Prace naukowe GIG, monografia nr 815, Katowice, 1996.
9. Główny Urząd Statystyczny, *Ochrona Środowiska 2012*, Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa, 2012.
10. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*, PN-B-04481:1988.
11. **Hermann J., Palicki J.:** *Zastosowanie popiołów lotnych do ochrony wód gruntowych przed odciekami z wysypisk odpadów komunalnych.* Ekologia i Technika, 2,2, 17–21 (1993).
12. **Myślińska E.:** *Laboratoryjne badania gruntów.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
13. **Nhan C.T., Graudon J.W., Kirk D.W.:** *Utilizing coal fly ash as a landfill barrier material.* Waste Management, vol.16, no.7, 587–595 (1996).

14. **Okoli R.E., Balafontas G.:** *Landfill sealing potentials of bottom ashes of sludge akces.* Soil & Tillage Research, 46, 307–314 (1998).
15. **Rosik-Dulewska Cz., Karwaczyńska U.:** *Metody ługowania zanieczyszczeń z odpadów mineralnych w aspekcie możliwości ich stosowania w budownictwie hydrotechnicznym.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 10, 205–219 (2008).
16. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów,* Dz.U.2003, nr 61, poz.549.
17. *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.2006, nr 137, poz.984.
18. **Sobik-Szołtysek J.:** *Metoda składowania odpadów na aktywnym podłożu szlamów flotacji blendy cynkowej.* Praca doktorska, niepublikowana, GIG, Katowice, 2002.
19. **Sobko W., Baic J., Blaschke W.:** *Depozyty mułów węglowych-inwentaryzacja i identyfikacja ilościowa.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 1405–1416 (2011).
20. *Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r.,* tekst jednolity, Dz.U.2010, nr 185, poz.1243.
21. **Wodziński P.:** *Wykorzystanie odpadów mineralnych w budowie składowisk odpadów komunalnych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 11, 485–496 (2009).
22. **Wysokiński L., Łukasik St., Majer E.:** *Badania gruntów do budowy przeston izolacyjnych na składowiskach odpadów.* Instrukcja nr 339/2003, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2003.
23. **Zabielska-Adamska K.:** *Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających.* Rozprawa Naukowa 136, Politechnika Białostocka, Białystok, 2006.
24. **Zawisza E.:** *Analiza przydatności drobnoziarnistych odpadów przemysłowych do uszczelniania obwałowań przeciwpowodziowych.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 4/2, 223–230 (2007).

Analysis of Filtration Coefficient in the Aspect of Possibilities for Application of Alternative Materials in Building Separation Screens in Landfills

Abstract

In the case of insufficiently tight natural geological barrier, the area of landfills should be protected by special artificial barriers (separation screens). The use of natural mineral materials for building the separation screens (loamy minerals, such as a variety of clays) requires their extraction from local deposits, which inevitably generates waste from extraction and treatment of the minerals, causes changes in hydrographic conditions and soil quality in the neighbourhood of the excavations, degraded landscape and additional costs, including the energy and examination of mineral usefulness. Therefore, it seems purposeful to search for replacement materials which are technologically and economically competitive, such as fine grain waste minerals and/or by-products from industrial activity. A fundamental parameter of the separation screen which ensures its efficiency in terms of stopping migration of pollutants outside the landfill is the adequate level of filtration coefficient, which according to legal regulation cannot be greater than $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

The aim of the present study was to analyse the filtration coefficient obtained as a result of the mixtures prepared from fine grain mineral waste and by-products from industrial activities under conditions of their maximum densification in order to find the material which shows the best tightness to match the requirements of separation screens for landfill applications. The following minerals were used in the study: coal dust from water and dust circulation system in the Sobieski mine in Jaworzno, Poland, fly ash from combustion of brown coal from Bełchatów power plant, fly ashes from combustion of black coal in conventional and fluidized bed furnaces in Łagisza power plant in Będzin, Poland, post-flotation from Zn-Pb ore dressing from inactive settler in the area of the city of Bytom and barren rock clays from brown coal deposits in the Bełchatów mine. These materials were used for preparation of 8 mixtures with various share of individual components with coal dust as the main component of the matrix, with participation of 50 wt%. Before the determination of filtration coefficient for each of the mixture began, the optimum humidity and maximum bulk density of the soil matrix was measured. In the most of the mixtures, the optimum humidity ranged from 25 to 27.5%, whereas in the case of the mixtures with bottom ash from fluidized bed and fly ash from the conventional furnace it was lower than 20%. Determination of the filtration coefficient was carried out on the specially designed stand under condition of fluid flow from

the bottom to the upper part of the sample, with variable hydraulic gradient and $i > 30$. Stabilization of the filtration coefficient was observed for the most of the mixtures after ca. 10–11 days from the beginning of the experiment, at the level typical of the particular mixture. The highest, unstable filtration coefficient of $1.6\text{--}2 \cdot 10^{-8}$ m/s was observed for the mixture of coal dust with the ashes from brown coal, which makes it impossible to be used as proposed. Nevertheless, application of another addition to this mixture (floatation waste and clays) considerably improved the coefficient of filtration, which reached the value of ca. $2\text{--}2,5 \cdot 10^{-9}$ m/s. The most favourable coefficient was obtained for the mixtures of coal dust with ashes from combustion of hard coal in fluidized bed furnaces, modified with an addition of clays. The value of filtration coefficient ranged from 3 to $6,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. The results of the investigations confirmed the ability of achieving the alternative material for building the separation screen which is the mixture of waste and by-products from industrial activities with over-additive properties. It is necessary to continue the research in the area of modification of the mixtures, particularly in the aspect of increased fraction of coal dust in order to optimize filtration coefficient and obtain the screen with satisfactory degree of tightness.