

WPŁYW DODATKU BENTONITU NA WARTOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI POPIOŁU LOTNEGO

Przemysław Baran¹, Cholewa Mariusz¹, Katarzyna Kamińska¹, Joanna Trzeciak²

¹ Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: p.baran@ur.krakow.pl

² Absolwentka Wydziału Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

STRESZCZENIE

Celem badań było określenie zmian współczynnika filtracji popiołu lotnego w wyniku dodania bentonitu w ilości 2, 5 i 10%. Ponieważ popiół lotny, z uwagi na swoją budowę wewnętrzną może stanowić materiał uszczelniający, a jednocześnie jego pozyskanie nie wiąże się z dużymi kosztami, Autorzy rozważyli możliwość połączenia go z niewielkim dodatkiem bentonitu, w celu wytworzenia stosunkowo niedrogiego materiału uszczelniającego. W ramach badań przedmiotowych wykonano oznaczenia współczynnika filtracji przy zmiennym gradiencie hydraulicznym za pomocą edometru, na próbkach preparowanych w warunkach laboratoryjnych przy wskaźniku zagęszczenia 0,95. W wyniku przeprowadzonych badań zauważono, iż nawet niewielki (2%) dodatek bentonitu powoduje zmniejszenie współczynnika filtracji o jeden rząd wielkości w stosunku do wyjściowego. Przy 10% dodatku obserwuje się zmniejszenie wspomnianego parametru o dwa rzędy wielkości. Patrząc z punktu widzenia „klasyfikacji charakterystyki przepływu” i „klasyfikacji przepuszczalności”, można stwierdzić, iż czysty popiół posiada słabą charakterystykę przepływu i niską przepuszczalność; 2% dodatek bentonitu powoduje iż badana mieszanka ma bardzo niską przepuszczalność, natomiast 10% dodatek bentonitu czyni ten materiał praktycznie nieprzepuszczalnym.

Słowa kluczowe: bentonit, popiół lotny, współczynnik filtracji, uszczelnienie

INFLUENCE OF BENTONITE ADDITION ON PERMEABILITY COEFFICIENT OF FLY ASH

ABSTRACT

The aim of the tests was to determine the changes in the permeability coefficient of fly ash by adding 2, 5 and 10% of bentonite. Due to its internal structure, fly ash, can be serve as a sealing material. Simultaneously, its acquisition does not involve high costs. Therefore, the authors considered the possibility of combining it with a small addition of bentonite to produce a relatively inexpensive sealing material. During the tests, the permeability coefficient was marked using an oedometer with a variable hydraulic gradient on laboratory prepared tests samples at compaction index 0.95. As a result of carried out tests it was noted that even a small (2%) bentonite addition caused the reduction of a permeability coefficient by one order of magnitude, relative to starting value. At the addition of 10%, a reduction by two orders of magnitude of the afore-mentioned parameter was noted. From the point of view of “characteristic flow water” and “classification of permeability”, it can be concluded that the pure ash exhibits weak flow water characteristic and low permeability; the 2% addition of bentonite lowers the permeability of mixtures even further, while the addition of 10% renders this material virtually impermeable from the practical point of view.

Keywords: bentonite, fly ash, permeability coefficient, sealing

WSTĘP

Unia Europejska od lat kładzie nacisk na ochronę środowiska m.in. poprzez ograniczenie oddziaływania przemysłu. Jednym z istotnych unijnych aktów prawnych jest Dyrektywa w spra-

wie emisji przemysłowych (tzw. Dyrektywa IED – 2010/75/UE). Unia zwraca szczególną uwagę na szeroko rozumianą ochronę środowiska, a w efekcie kraje członkowskie koncentrują się m.in. na edukacji ekologicznej [Pawul i Sobczyk 2011], rekultywacji terenów pogórnich [Sob-

czyk i in. 2012], ochronie przyrody [Sobczyk i in. 2014], czy też racjonalnej gospodarce odpadami [Klojzy-Karczmarczyk i Makoudi 2011]. Spalanie węgla o określonej zawartości popiołu powoduje nie tylko emisję pyłów, ale również powstawanie odpadów stałych, proporcjonalnie do zawartości popiołu w węglu i w zależności od skuteczności odpylania spalin [Grudziński i Stala-Szlugaj 2016]. Zastosowanie popiołów do budowy obiektów ziemnych stanowi alternatywę dla coraz droższych materiałów naturalnych. Szerokie badania nad właściwościami popiołów lotnych umożliwiły ich wykorzystanie między innymi w technologii utwardzania i uszczelniania gruntów, do produkcji spoiw bezcementowych, i klinkieru portlandzkiego, do budowy dróg itp. [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005], czy nasypów szeroko rozumianego budownictwa ziemnego [Gruchot i Zydrón 2013]. Postęp technologii inżynierskich wpłynął na rozwój sztucznych barier ochronnych, a ich głównym zadaniem jest uszczelnianie podłoża. W tym celu często stosowanym surowcem jest bentonit, który można mieszać z innym gruntem, spoiwem lub geosyntezykiem, uzyskując materiał wodoszczelny [Borys 2009]. Szerokie zastosowanie bentonit znalazł do produkcji zawieszin twardniejących stosowanych w rozmaitych robotach inżynierskich. Bentonit odgrywa również ważną rolę w wiertnictwie, stosowany jako dodatek płuczki wiertniczej stabilizuje i uszczelnia otwór jak również odpowiada za transport zwiercin na powierzchnię. Mieszanka tego minerału z piaskiem krzemianowym wykorzystywana jest jako materiał termoprzewodzący, który używa się w trakcie budowy sondy geotermalnej, zapewniając dobrą przewodność cieplną, stabilizację oraz uszczelnienie otworu. Bentonity mogą być również wykorzystywane w inżynierii środowiska. Szerokie zastosowanie znajdują w technologii wody i ścieków do sorpcji wielu rodzajów zanieczyszczeń, m.in.: barwników, usuwania metali ciężkich, fenoli, fluoru oraz do oczyszczania kwasów przemysłowych [Góra i in. 2016]. Budowle ziemne pełniące funkcję użytkową lub ochronną to między innymi: zapory ziemne, wały przeciwpowodziowe, tamy, składowiska odpadów itp. Ich głównym zadaniem jest ochrona ludzi i ich mienia jak również ochrona środowiska. Niezależnie od funkcji użytkowych najważniejszym kryterium decydującym o pełnej ich sprawności i funkcjonalności jest szczelność. Najważniejszym parametrem geotechnicznym decydującym o szczelności budowli ziemnej jest

współczynnik filtracji. Znajomość tego parametru jest niezbędna w przypadku rozważań inżynierskich takich jak budowa zapór i obwałowania rzek, składowisk odpadów, posadowienia budowli oraz stateczności skarp i wykopów fundamentowych w sytuacji działania wód gruntowych o zmiennym gradiencie hydraulicznym. Poprzez odpowiedni dobór składu masy uszczelniającej możliwe jest uzyskanie przesłony o małej przepuszczalności. W publikacjach naukowych spotkać można wyniki badań dotyczące wpływu dodatku popiołu na wodoprzepuszczalność odpadów powęglowych [Zawisza i Malec 2016], czy też wpływu bentonitu na możliwość stosowania jako uszczelnień składowisk odpadów, osadów dennych zbiorników zaporowych [Kos i Zawisza 2016]. Jak widać problem wykorzystania materiałów odpadowych w konstrukcjach z zakresu budownictwa ziemno-hydrrotechnicznego wymaga podjęcia prób łączenia tych materiałów z materiałami naturalnymi, gdyż istnieje potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań umożliwiających pełniejsze wykorzystanie specyficznych właściwości konkretnego materiału konstrukcyjnego. Stąd, w ramach niniejszego artykułu wykonano badania współczynnika filtracji wybranego gruntu antropogenicznego i jego mieszanek z dodatkiem bentonitu, celem znalezienia możliwie niskokosztowego materiału uszczelniającego.

MATERIAŁY

Jednym z materiałów, który posłużył do badań był popiół lotny (rys. 1), który pochodził z Elektrowni Skawina (woj. małopolskie). Badany popiół jest produktem ubocznym powstałym w wyniku spalania węgla kamiennego z dodatkiem biomasy w procesie wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej, oraz pary technologicznej. Węgiel zmielony jest do postaci drobnego pyłu, a następnie wdmuchiwany do paleniska kotła i spalany w temperaturze 1400°C. W wyniku tego procesu mineralne części skał zawarte w węglu, których nie można spalić, ulegają częściowemu lub całkowitemu topnieniu, a po spalaniu węgla zawarte są w powstałej mieszaninie pyłowo-gazowej, z której frakcja pyłowa (popiół lotny) jest wytrącana głównie elektrostatycznie (w elektrofiltrach), niekiedy mechanicznie (np. filtry tkaninowe). Popioły lotne mają zróżnicowany skład chemiczny. Z węgla kamiennego z reguły uzyskuje się popioły zasobne w SiO_2



Rys. 1. Popiół lotny użyty do badań

Fig. 1. Fly ash used in the tests

i Al_2O_3 , a z węgla brunatnego na ogół bogatsze w CaO . Skład chemiczny popiołu uzyskiwanego w danej elektrowni czy elektrociepłowni jest bezpośrednią pochodną jakości użytkowanego przez zakład węgla [Galos i Uliasz-Bocheńczyk 2005]. Szkodliwymi składnikami są związki siarki, których ilość zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury spalania.

Drugim materiałem użytym do badań był bentonit. Bentonity są skałami ilastymi, powstałymi w wyniku montmorylonityzacji szkliwa wulkanicznego, występującego w osadach piroklastycznych, takich jak tufy czy tufity. Zbudowane są przede wszystkim z minerałów grupy smektytu (głównie montmorylonitu), którym towarzyszą resztki materiału piroklastycznego, reprezentowane przez takie minerały jak np. sanidyn, biotyt, kwarc, minerały ciężkie, a także szkliwo wulkaniczne, opal cristobalitowy i zeolity. Pokrewne bentonitom są ły bentonitowe i ły montmorylonitowe, różniące się od nich udziałem innych – poza smektytami – minerałów ilastych [Wyszomirski i Lewicka 2005]. Wykorzystany bentonit, występujący pod nazwą handlową Hekobent (rys. 2) jest aktywnym bentonitem sodowym, przeznaczonym do wykonywania między innymi: ścianek szczelinowych, tworzenia zaczynów do iniekcji strumieniowych „jet-grouting”, zabezpieczenia i uszczelniania zbiorników wodnych, wałów przeciwpowodziowych, jak również do wykonywania przesłon wodoszczelnych. Często stosowany jest do tworzenia nieprzepuszczal-

nych barier ochronnych między innymi dla substancji mogących stanowić zagrożenie ludności oraz środowiska. Produkt w sposób efektywny może chronić przed skażeniem ziemi, wód gruntowych, rzek, stawów i jezior. Posiada dobrze skomponowane parametry reologiczne, przez co wykorzystywany jest w wiertnictwie jako płuczka wiertnicza. Wspomniany bentonit jest mineralną mieszaniną, zawierającą minimalnie 65% montmorylonitu, maksymalnie 4% kwarcu i 35% innych minerałów.

W ramach niniejszego artykułu wykonano badania wybranych właściwości fizycznych (w tym współczynnika filtracji) zarówno czystego popiołu lotnego, jak i jego mieszanek z dodatkiem 2%, 5% i 10% wspomnianego bentonitu.

METODY BADAWCZE

Badania wstępne miały na celu rozpoznanie podstawowych parametrów geotechnicznych badanego popiołu lotnego i jego mieszanek z bentonitem, dzięki którym możliwe było wykonanie zasadniczych badań filtracji. W ramach badań podstawowych wykonano: a) oznaczenie gęstości właściwej szkieletu gruntowego (metodą piknometru), b) analizę uziarnienia (metodą sitową i areometryczną), c) oznaczenie wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (metodą Proctora, zagęszczając każdą warstwę 25 uderzeniami



Rys. 2. Bentonit użyty do badań
Fig. 2. Bentonite used in the tests

ubijaka lekkiego, opuszczając go z wysokości 320 mm, co odpowiadało jednostkowej energii zagęszczania wynoszącej $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ gruntu). Wszystkie wspomniane badania zostały przeprowadzone w oparciu o normę PN-B 04481:1981, PN-EN ISO 13286-2:2007, PN-EN ISO 14688-2:2006. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunku 3.

Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było sporządzenie próbek do zasadniczych badań współczynnika filtracji. Z uwagi na charakter użytych materiałów, badania filtracji przeprowadzono na próbkach formowanych w warunkach laboratoryjnych. Założono, iż próby będą charakteryzować się wskaźnikiem zagęszczenia $I_s=0,95$ i będą formowane przy wilgotności optymalnej.

W celu określenia współczynnika filtracji badanie popiołu lotnego i jego mieszanek przepro-

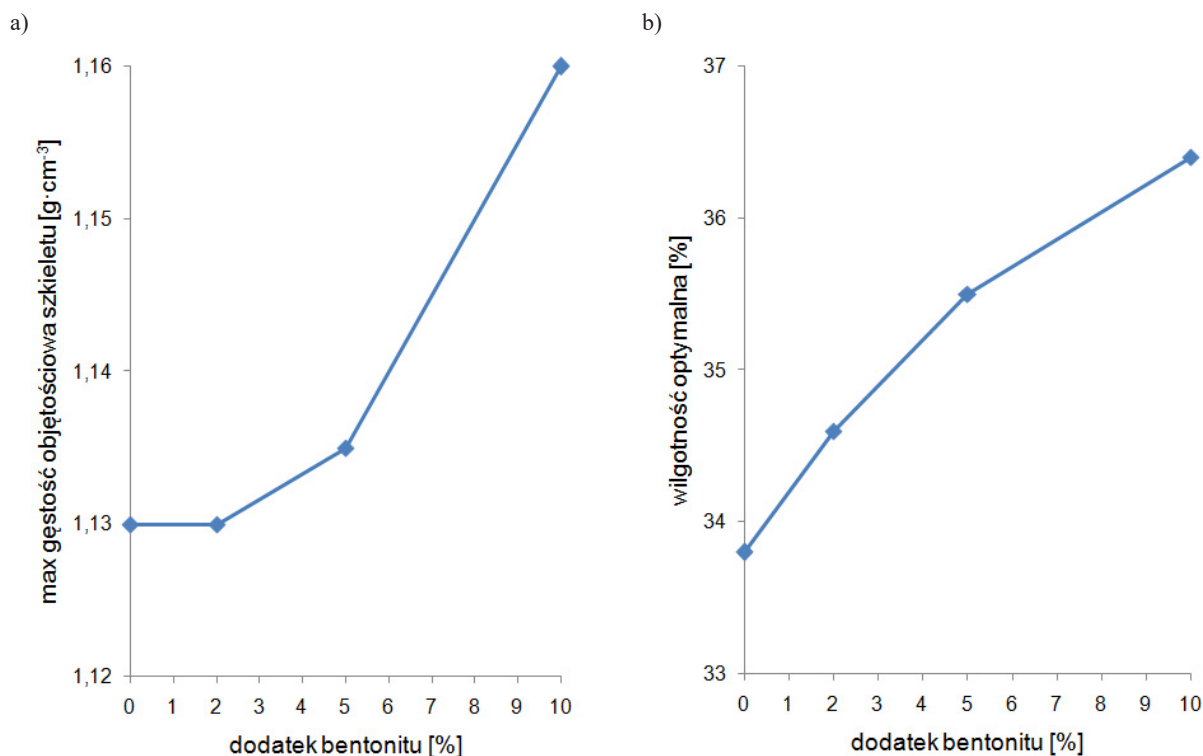
wadzono w odpowiednio dostosowanych edometrach, które są aparatami bezpośrednio służącymi do badania ścisłości gruntów. Budowę edometru do pomiaru współczynnika filtracji gruntów spoistych przedstawiono schematycznie na rys. 4. Wymiary wewnętrzne pierścienia edometru wyniosły 2 cm (wysokość) i 6,5 cm (średnica).

Możliwość zmiennego spadku hydraulicznego jak również zmiana obciążenia pozwala na odtworzenie warunków zbliżonych do naturalnych. Współczynnik filtracji (k_T) dla próbki gruntu o wysokości (L), oblicza się na podstawie obserwacji obniżającego się poziomu wody w rurce pomiarowej o średnicy (a), z wysokości (h_1) do (h_2), w czasie (t_2-t_1), przy temperaturze filtrującej wody (T):

$$k_T = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

Tabela 1. Wybrane parametry geotechniczne badanego popiołu i jego mieszanek
Table 1. Chosen geotechnical parameters of investigated ash and its mixtures

Parametr		Dodatek bentonitu do popiołu lotnego			
		0%	2%	5%	10%
Zawartość frakcji [%]	$f_k + f_z$	0	0	0	0
	f_p	8.1	7.6	7.57	7.05
	f_{II}	82.7	86.32	82.28	85.5
	f_I	9.2	6.09	10.15	7.44
Klasyfikacja gruntu według normy PN-EN ISO		Pył (Si)	Pył (Si)	Pył ilasty (clSi)	Pył (Si)
Gęstość właściwa szkieletu ρ_s [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		2,19	2,20	2,21	2,22
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		1,13	1,13	1,135	1,16
Wilgotność optymalna w_{opt} [%]		33,80	34,60	35,50	36,40



Rys. 3. Wpływ dodatku bentonitu na wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej

Fig. 3. Influence of bentonite addition on the value of maximum dry density and optimum moisture content

Wyznaczoną w badaniu wartość współczynnika filtracji przeliczono na temperaturę umowną 10°C według poniższej formuły [Wysokiński i in. 2003]:

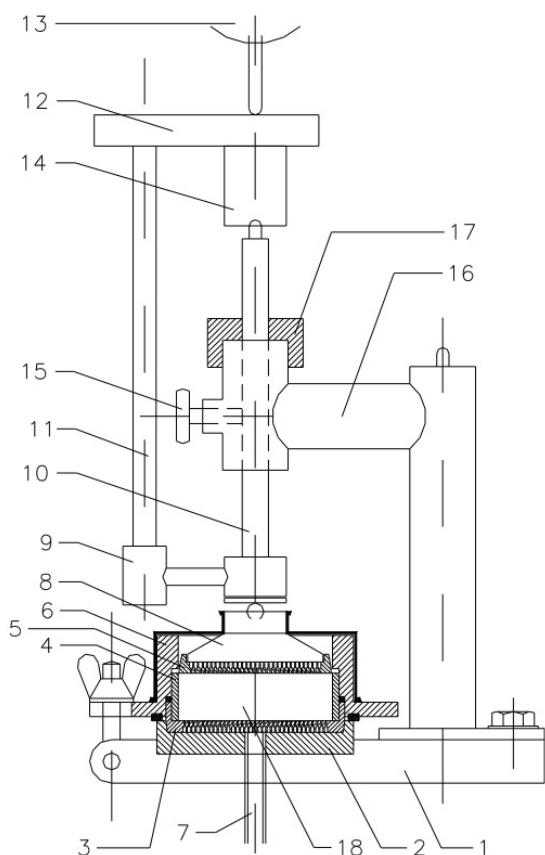
$$k_{10} = \frac{1,359 \cdot k_T}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (2)$$

gdzie: T – średnia arytmetyczna z temperatury początkowej i końcowej [°C]
 $[k_T], [k_{10}] = [m \cdot s^{-1}]$

Badanie współczynnika filtracji dla czystego popiołu lotnego i mieszanki popiołu z odpowiednią domieszką procentową bentonitu wykonano w edometrze polskim. Badanie przeprowadzono w 5 próbach dla każdej mieszanki w celu minimalizacji błędów. Ponieważ przygotowanie prób odbywało się z założeniem konkretnych i jednakowych – jak na stosowane możliwości – parametrów zagęszczenia, stąd wszystkie badania wykonano w możliwie jednakowy sposób, prowadząc obserwacje przez ten sam czas. Próbkę gruntu zagęszczano w pierścieniu w trzech warstwach, przy wilgotności optymalnej, aby uzyskać wskaźnik zagęszczenia $I_s=0,95$. Tak przygotowane próbki zamontowano we wcześniej odpowiedniej komorze edometru na filtrze dolnym.

W celu zabezpieczenia próbki przed przeciekaniem, brzegi pierścienia posmarowano smarem silikonowym oraz założono gumy uszczelniające. Nałożono filtr górny i oprawę, po czym zainstalowano czujniki zegarowe, których zadaniem było rejestrowanie wysokości próby w trakcie badania. Po ustawieniu czujników dokonano ich odczytu „zerowego”, a następnie zadano obciążenie ramą edometru o wartości 12,5 kPa na filtr górny. Po przeprowadzeniu konsolidacji doprowadzono wodę destylowaną do rurki pomiarowej. Badanie trwało do momentu ustabilizowania się współczynnika filtracji. Dla mieszanek z dodatkiem bentonitu odczyt poziomu wody w rurkach piezometrycznych dokonywano co 15 minut, natomiast dla popiołu lotnego bez domieszki co 5 minut. Całkowity czas badań współczynnika filtracji wynosił 5 dni na jedną próbę.

Po zakończeniu badań pierścieni z gruntem ważono, a następnie suszono do stałej masy w celu ustalenia wilgotności końcowej materiału. Przyrost wilgotności po badaniu, względem wilgotności optymalnej (przy której formowano próbki) przedstawiono na rysunku 5. Wyniki uzyskanych wartości współczynników filtracji przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 6.

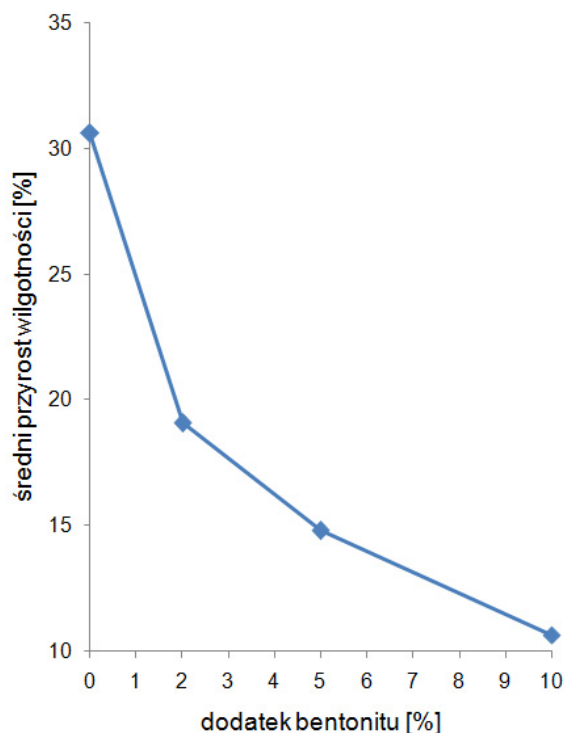


Opis edometru	
1.	Podstawa
2.	Wkładka
3.	Filtr dolny
4.	Pierścień wewnętrzny
5.	Filtr górny
6.	Pierścień dociskowy
7.	Rurka
8.	Nadstawka
9.	Uchwyt do podstawki czujnika
10.	Sworzeń dociskowy
11.	Pręt pionowy
12.	Płytkę górną
13.	Czujnik zegarowy
14.	Ramka obciążająca
15.	Śruba dociskowa
16.	Maszt
17.	Aretaż
18.	Próbka gruntu

Rys. 4. Schemat edometru użytego do pomiarów współczynnika filtracji
 Fig. 4. A schema of an oedometer used in the permeability coefficient measuring

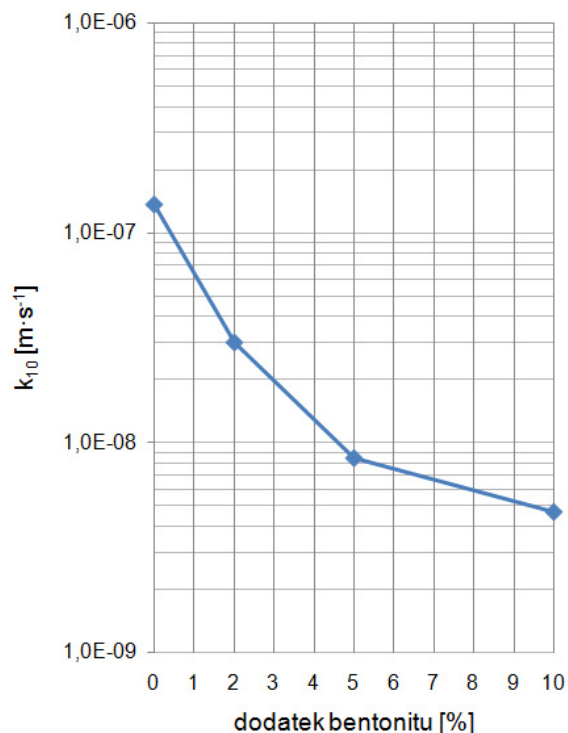
Tabela 2. Współczynnik filtracji badanego popiołu i jego mieszanek z bentonitem
 Table 2. The permeability coefficient of investigated ash and its mixtures

Rodzaj materiału	k_T	k_T (średnie)	k_{10}
	[m·s ⁻¹]		
P100%B0%	1,581E-07	1,686E-07	1,355E-07
	3,495E-08		
	1,710E-07		
	3,892E-07		
	8,950E-08		
P98%B2%	2,413E-09	3,736E-08	3,004E-08
	3,224E-08		
	7,741E-09		
	6,287E-08		
	8,154E-08		
P95%B5%	3,352E-09	1,044E-08	8,390E-09
	2,125E-08		
	7,211E-09		
	1,124E-08		
	9,128E-09		
P90%B10%	5,420E-09	5,773E-09	4,641E-09
	7,200E-09		
	3,215E-09		
	4,514E-09		
	8,517E-09		



Rys. 5. Wpływ dodatku bentonitu na zmianę wilgotności w wyniku procesu filtracji

Fig. 5. Influence of bentonite addition on the moisture content change during a filtration process



Rys. 6. Wpływ dodatku bentonitu na wartość współczynnika filtracji

Fig. 6. Influence of bentonite addition on the value of permeability coefficient

ANALIZA WYNIKÓW

W wyniku dodania bentonitu do badanego popiołu lotnego obserwuje się zmiany wyjściowych parametrów fizycznych gruntu. W przypadku gęstości właściwej szkieletu widać wzrost tego parametru wraz z procentowym dodatkiem bentonitu, przy czym dalsze dodawanie bentonitu skutkuje powolnym i nieproporcjonalnym wzrostem wspomnianej gęstości. W przypadku parametrów zagęszczenia, wzrost procentowego udziału bentonitu w badanych próbach spowodował zarówno wzrost maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu, jak i wilgotności optymalnej. Obserwuje się również niewielki wpływ bentonitu na rodzaj gruntu powstałego w wyniku zmieszania go z badanym popiołem lotnym. Analizując rozkład frakcji gruntu widoczny jest (wraz z dodawaniem bentonitu) spadek procentowego udziału frakcji piaskowej kosztem frakcji głównie pyłowej i w niewielkim stopniu łożowej. Wspomniane zmiany również nie pozostają bez wpływu na wynik przedmiotowych badań współczynnika filtracji. Na podstawie uzyskanych wyników badań, widoczne jest, iż nawet

niewielki (2%) dodatek powoduje zmniejszenie współczynnika filtracji o jeden rząd wielkości w stosunku do wyjściowego. Przy 10% dodatku obserwuje się zmniejszenie wspomnianego parametru o dwa rzędy wielkości. Patrząc z punktu widzenia „klasyfikacji charakterystyki przepływu” i „klasyfikacji przepuszczalności” [Head 1994], można stwierdzić, iż czysty popiół posiada słabą charakterystykę przepływu i niską przepuszczalność. 2% dodatek bentonitu powoduje iż badana mieszanka ma bardzo niską przepuszczalność, natomiast 10% dodatek bentonitu czyni ten materiał praktycznie nieprzepuszczalnym. Widoczny jest również wpływ dodatku bentonitu na wilgotność końcową badanych mieszanek. Zwiększenie szczelności mieszanki skutkuje zamknięciem pewnych kanalików, wytworzonych przez pory gruntowe, co bezpośrednio przekłada się na mniejszą możliwość płynięcia wody, a tym samym na końcową wilgotność próby. Podsumowując, można stwierdzić iż dodatek naturalnego materiału jakim jest bentonit, do materiału antropogenicznego – popiołu lotnego, skutkuje powstaniem materiału gruntowego o bardzo dobrych właściwościach uszczelniających.

WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań i przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Nie obserwuje się znaczącej zmiany uziarnienia w wyniku dodania bentonitu do popiołu lotnego.
2. Nawet 2% dodatek bentonitu do popiołu lotnego znacznie obniża wartość współczynnika filtracji takiej mieszanki.
3. 10% dodatek bentonitu do popiołu lotnego czyni mieszankę praktycznie nieprzepuszczalną.
4. Niskie wartości współczynnika filtracji analizowanych mieszanek czynią je materiałem dobrym do ograniczenia filtracji.
5. Bentonit jest materiałem kosztownym z tego względu połączenie go z popiołem lotnym skutkuje wytworzeniem dobrego i stosunkowo niedrogiego materiału o praktycznym zastosowaniu.

Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić wdzięczność firmie Hekobentonity Sp. z o. o. za dostarczenie bentonitu, a tym samym za możliwość wykonania przedmiotowych badań na jego mieszankach z popiołem lotnym.

BIBLIOGRAFIA

1. Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A. 2005. Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 21(1), 23–42
2. Góra P., Góra W., Jaszczyszyn K. 2016. Perspektywy zastosowania naturalnych bentonitów w technologii ścieków przemysłowych. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 18, 940–951
3. Gruchot A., Zydroń T. 2013. Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żuźłowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 15, 1719–1737
4. Grudziński Z., Stala-Szlugaj K. 2016. Koszty środowiskowe a użytkowanie węgla kamiennego w obiektach o mocy do 50 MW. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 18, 579–596
5. Head K. H. 1994. *Manual of Soil Laboratory Testing. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Vol. 3.* Pentech Press. London.
6. Kłojzy-Karczmarczyk B., Makoudi S. 2011. Szacowanie wskaźnika wytwarzania odpadów zawierających azbest na obszarach wiejskich wybranych gmin. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 13, 1823–1834
7. Koś K., Zawisza E. 2016. Laboratory tests of bentonite stabilization of bottom sediments from a dam reservoir in relation to their usage in Municipal Solid Waste Landfill liners. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(3), 83–90
8. Pawul M., Sobczyk W. 2011. Edukacja ekologiczna w zakresie gospodarki odpadami jako narzędzie realizacji zrównoważonego rozwoju. *Problems of sustainable development*, 6(1), 147–156.
9. Sobczyk W., Biedrawa-Kozik A., Kowalska A. 2012. Threats to Areas of Natural Interest. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 14, 262–273.
10. Sobczyk W., Kowalska A., Sobczyk E. J. 2014. Wykorzystanie wielokryterialnej metody AHP i macierzy Leopolda do oceny wpływu eksploatacji złóż żwirowo-piaskowych na środowisko przyrodnicze doliny Jasiołki. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 30(2), 157–172
11. Wysokiński L., Łukasik S., Majer E. 2003. Badania gruntów do budowy przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów. *Instytut Techniki Budowlanej. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki. Nr 339/2003.* Warszawa.
12. Wyszomirski P., Lewicka E. 2005. Bentonity jako uniwersalny surowiec wielu dziedzin przemysłu. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 21(3), 5–19
13. Zawisza E., Malec P. 2016. Wodoprzepuszczalność przepalonych odpadów powęglowych oraz ich mieszanek z popiołem lotnym. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(3), 187–194.