

EUGENIUSZ ZAWISZA, KATARZYNA KAMIŃSKA, IZABELA JANUSZ

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

WODOPRZEPUSZCZALNOŚĆ ŻUŻLI WIELKOPIECOWYCH, POPIOŁÓW LOTNYCH ORAZ ICH MIESZANEK

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wodoprzepuszczalności wybranych żużli wielkopieczowych, popiołów lotnych oraz ich mieszanek przy różnym ich zagęszczeniu. Materiały do badań stanowiły: żużel wielkopieczowy (0–31,5 mm) pochodzący z Centralnego Zwałowiska Pleszów huty ArcelorMittal Poland, popiół lotny z Elektrowni Skawina S.A. oraz mieszanki żużla z popiołem, w których zawartość popiołu wynosiła 10, 20 i 30% (wagowo). Stwierdzono, że wodoprzepuszczalność badanych materiałów była zależna głównie od zagęszczenia. Wraz ze zwiększaniem się wartości wskaźnika zagęszczenia I_s od 0,90 do 1,00 następowało zmniejszanie wartości współczynnika filtracji o jeden, dwa, a nawet prawie o trzy rzędy wielkości. Dodatek popiołu lotnego do żużla wielkopieczowego powodował jego uszczelnienie i w efekcie znaczne zmniejszenie współczynnika filtracji: od rzędu 10^{-3} - 10^{-4} $m \cdot s^{-1}$ dla żużla do 10^{-7} - 10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ dla żużla z 30-procentowym dodatkiem popiołu.

Słowa kluczowe: odpady przemysłowe, żużle wielkopieczowe, popioły lotne, właściwości geotechniczne, wodoprzepuszczalność

Wstęp

Odpady przemysłowe, do których zalicza się głównie materiały odpadowe z kopalń węgla kamiennego (skała płonna), hutnictwa (żużle wielkopieczowe i konwertorowe) i energetyki (popioły lotne), stwarzają poważne problemy gospodarcze, ponieważ ich składowanie prowadzi do dewastacji gleb, powietrza atmosferycznego oraz wód powierzchniowych i podziemnych (SKARŻYŃSKA 1997, KOWALÓW 2000, ZADROGA i OLAŃCZUK-NEYMAN 2001, ZAWISZA 2001, ROSIK-DULEWSKA 2007). Składowanie takich masowych odpadów przemysłowych wymaga również zajmowania dużych powierzchni terenu. Najczęściej były to tereny utracone, które w późniejszym czasie wymagały rekultywacji. W ciągu ostatnich 10-15 lat wzrosło wykorzystanie odpadów przemysłowych. Przede wszystkim zmienił się ich wizerunek – z materiałów szkodli-

wych dla środowiska przyrodniczego na produkty, które mogą być stosowane w wielu dziedzinach związanych z budownictwem ziemnym – komunikacyjnym i hydrotechnicznym, a także z górnictwem. W budownictwie ziemnym stosowane są np. do budowy obwałowań rzek, nasypów drogowych czy też grobli różnego typu osadników. W górnictwie stosowane są głównie jako materiały podsadzkowe. Coraz częściej odpady przemysłowe są materiałem alternatywnym dla gruntów mineralnych, zwłaszcza jeśli wziąć pod uwagę ich cenę (galos-uliasz-bochenczyk.pdf).

Analizę przydatności odpadów przemysłowych do celów budownictwa drogowego lub hydrotechnicznego przeprowadza się na podstawie wyników badań ich właściwości geotechnicznych. Ważne jest zwłaszcza określenie parametrów charakteryzujących ich uziarnienie, zagęszczalność, wytrzymałość na ścinanie oraz wodoprzepuszczalność.

Material i metody

Charakterystyka geotechniczna badanych materiałów

Badania przeprowadzono na trzech rodzajach materiałów, takich jak:

- żużel wielkopieczowy o uziarnieniu < 31,5 mm, wytworzony przez Slag Recycling Sp. z o.o. z odpadów huty ArcelorMittal Poland S.A. w Krakowie, zalegających na składowisku „Pleszów”,
- popiół lotny pochodzący ze zsyków przy elektrofiltrach Elektrowni Skawina,
- mieszanki żużla wielkopieczowego z dodatkiem 10, 20 i 30% (wagowo) popiołu.

Wartości podstawowych parametrów fizycznych badanych materiałów oznaczono metodami standardowymi, stosowanymi w geotechnice dla gruntów mineralnych (PN-88/B-04481). Skład uziarnienia oznaczono metodą łączoną, to jest sitową „na mokro” i areometryczną dla cząstek mniejszych od 0,063 mm, w dwóch powtórzeniach. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono dla cząstek mniejszych od 0,063 mm, metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej w dwóch powtórzeniach. Maksymalną gęstość objętościową szkieletu i wilgotność optymalną żużla wielkopieczowego i mieszanek żużla z popiołem oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości 2,2 dm³, natomiast popiołu – w cylindrze o objętości 1,0 dm³, bez powtórzeń. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie, czyli kąta tarcia wewnętrznego i spójności, podano na podstawie wcześniejszych badań ZAWISZY i KAWALI (2007).

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1. Uziarnienie popiołu pod względem geotechnicznym odpowiada pyłom, żużel wielkopieczowy i mieszanka żużla z 10% dodatkiem popiołu – zwirom, a mieszanki żużla z 20% i 30% dodatkiem popiołu – zwirom gliniastym. Według wartości wskaźnika różnoziarnistości popioły lotne można określić jako różnoziarniste, żużel wielkopieczowy również jako różnoziarnisty, natomiast mieszanki żużla z popiołem jako bardzo różnoziarniste. W przypadku mieszanek wartości wskaźnika różnoziarnistości były bardzo duże i zwiększały się wraz ze wzrostem zawartości popiołu.

Tabela 1. Podstawowe właściwości fizyczne badanych materiałów
Table 1. Basic physical properties of the materials tested

Parametr Parameter	Popiół lotny Fly ash	Żużel wielkopie- cowy Blast furnace slag	Mieszanki żużla z dodatkiem popiołu Mixture of slag with ash additive		
			10%	20%	30%
Zawartość frakcji (%): Fraction content (%):					
– żwirowa – gravel (40-2 mm)	0,00	79,69	76,75	65,09	57,48
– piaskowa – sand (2-0,05 mm)	9,50	18,21	14,69	18,87	18,69
– pyłowa – silt (0,05-0,002 mm)	86,50	1,89	7,25	14,06	20,37
– ilowa – clay (< 0,002 mm)	4,00	0,21	1,31	2,28	3,45
Nazwa wg PN-86/B-02480 Name acc. to PN-86/B-02480	II	Ż	Ż	Żg	Żg
Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient	6,0	11,8	100	642	935
Gęstość właściwa szkieletu ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Density of solid particles ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,27	2,84	2,33	2,325	2,32
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Maximum dry density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,23	1,78	1,89	1,85	1,77
Wilgotność optymalna (%) Optimum moisture content (%)	28,3	14,7	15,92	16,57	17,19
Kat tarcia wewnętrznego przy $I_s = 0,95^*$ Angle of internal friction at $I_s = 0,95^*$	30,7	48,7	48,6	43,5	40,9
Spójność przy $I_s = 0,95^*$ Cohesion at $I_s = 0,95^*$	26,3	68,4	62,2	55,6	29,5

*ZAWISZA i KAWAŁA 2007.

*ZAWISZA and KAWAŁA 2007.

Gęstość właściwa szkieletu popiołu lotnego wynosiła $2,27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, natomiast żużla wielkopieczowego (dla $d < 0,063 \text{ mm}$) była dużo większa – $2,84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Wartości gęstości właściwej mieszanek żużla z popiołem (dla $d < 0,063 \text{ mm}$) były nieco większe niż popiołu, ale dużo mniejsze niż żużla i wynosiły $2,32\text{-}2,33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu popiołu lotnego była nieduża i wynosiła $1,23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, natomiast żużla wielkopieczowego była dużo większa – $1,78 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Mieszanki żużla z 10- i 20-procentowym dodatkiem popiołu miały większe wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu niż sam żużel, natomiast mie-

szanka żużla z 30-procentowym dodatkiem popiołu miała zbliżoną wartość omawianego parametru do stwierdzonej dla żużla.

Wartość wilgotności optymalnej popiołu wynosiła ponad 28%, natomiast żużla wielkopieczowego była prawie dwa razy mniejsza. Wartości wilgotności optymalnej mieszanek żużla z popiołem były nieco większe niż dla żużla i zwiększały się od 15,9 do 17,2%, wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu od 10 do 30%.

Kąt tarcia wewnętrznego popiołu wynosił 31° , natomiast żużla wielkopieczowego był o 18° większy. Mieszanka żużla z 10-procentowym dodatkiem popiołu wykazała kąt tarcia wewnętrznego odpowiadający samemu żużlowi, natomiast mieszanki z większym dodatkiem popiołu wykazały malejącą wartość omawianego parametru – do około 41° przy 30-procentowym dodatku popiołu.

Spójność popiołu wynosiła ponad 26 kPa, a żużla wielkopieczowego była prawie trzykrotnie większa. Mieszanki żużla z popiołem wykazały malejącą wartość spójności wraz ze zwiększaniem dodatku popiołu – od 62 kPa przy 10-procentowym dodatku popiołu do około 30 kPa przy 30-procentowym dodatku popiołu.

Cel i metoda badań

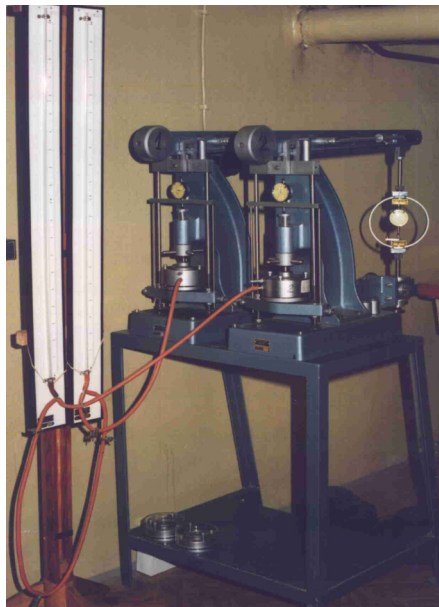
Zasadniczym celem prezentowanych badań było określenie wpływu zagęszczenia na wodoprzepuszczalność żużla wielkopieczowego i mieszanek żużla z popiołem lotnym. Uwzględniono również wyniki badań wodoprzepuszczalności popiołu (FURTAK 2009) dla dokonania analizy porównawczej wszystkich trzech rodzajów materiałów odpadowych.

Badania wodoprzepuszczalności żużla wielkopieczowego i mieszanek żużla z popiołem przeprowadzono w aparacie średniowymiarowym (rys. 1). Aparat składa się z metalowego cylindra o średnicy wewnętrznej i wysokości 36 cm, dolnego i górnego filtra; jest też wyposażony w zawory do doprowadzania i odprowadzania wody, rurki piezometryczne oraz przelew ruchomy. Średnica cylindra spełnia wymóg badania gruntów gruboziarnistych ($\phi_w \geq 5 d_{\max}$; $d_{\max} = 31,5$ mm). Również wymóg, aby długość drogi filtracji była większa lub równa średnicy wewnętrznej cylindra ($L \geq \phi_w$), jest spełniony ($L = H$). Próbkę do badań formowano przy wilgotności bliskiej optymalnej ($\sim 0,7 w_{\text{opt}}$) dla danego materiału, przez zagęszczanie warstwami o grubości 6 cm do łącznej wysokości 36 cm. Dla określenia wpływu zagęszczenia na wartości współczynnika filtracji badania prowadzono przy trzech wartościach wskaźnika zagęszczenia próbek, to jest przy $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Filtrację wody przez próbki prowadzono przy obciążeniu pionowym 10 kPa, przy stałym spadku hydraulicznym w dwóch kierunkach – z dołu do góry (dla wyeliminowania pęcherzyków powietrza), a następnie z góry na dół, do ustabilizowania przepływu filtracyjnego. Uzyskane przy obydwu kierunkach filtracji wartości współczynnika filtracji uśredniono (k_t), a następnie przeliczono do umownej temperatury 10°C (k_{10}).

Badania wodoprzepuszczalności popiołu lotnego przeprowadzono w edometrach (rys. 2) przy zmiennym spadku hydraulicznym, na próbkach o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Jako wyniki badań podano wartości średnie współczynnika filtracji k_{10} – z dwóch oznaczeń (FURTAK 2009).



Rys. 1. Aparaty średniowymiarowe do badań współczynnika filtracji (fot. A. Owskiński)
Fig. 1. Medium size apparatus for filtration coefficient tests (photo by A. Owskiński)

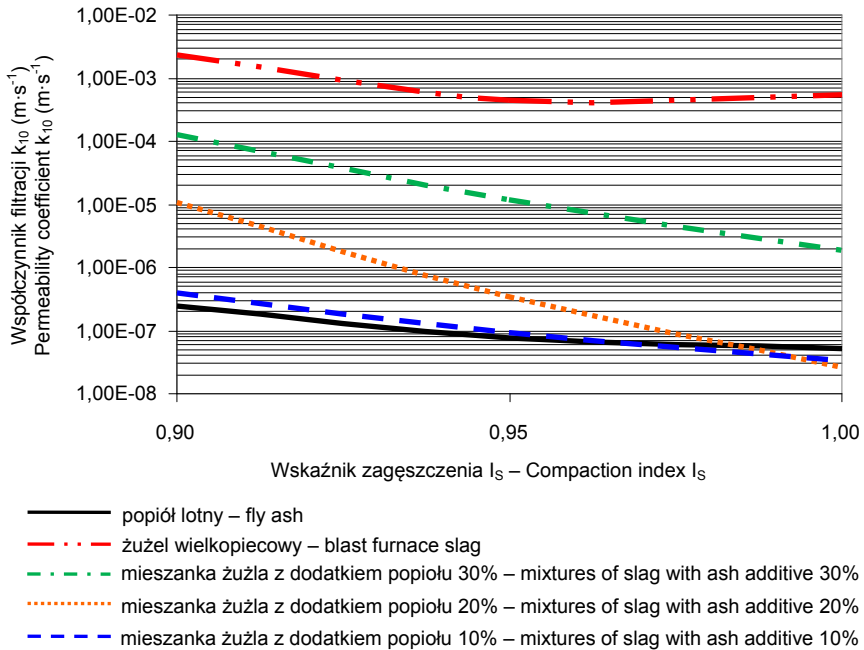


Rys. 2. Edometry z oprzyrządowaniem do badań współczynnika filtracji (fot. A. Owskiński)
Fig. 2. Oedometres with the equipment for filtration coefficient tests (photo by A. Owskiński)

Wyniki

Wodoprzepuszczalność popiołu lotnego była wyraźnie zależna od zagęszczenia. Przedstawiony na rysunku 3 wykres zależności współczynnika filtracji od wskaźnika zagęszczenia wskazuje, że znaczne zmniejszenie wodoprzepuszczalności popiołu nastąpiło po zwiększeniu zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do $0,95$ (od $2,5 \cdot 10^{-7}$ do $7,5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), natomiast dalsze zwiększenie zagęszczenia do $I_s = 1,00$ nie spowodowało istotnego zmniejszenia wodoprzepuszczalności. Odnosząc otrzymane wartości współczynnika filtracji do wartości podawanych dla gruntów mineralnych, można stwierdzić, że badany popiół charakteryzuje się wodoprzepuszczalnością odpowiadającą gruntom spoiwym, takim jak gliny, mułowce czy ropy piaszczyste (PAZDRO i KOZERSKI 1990). Popiół został sklasyfikowany jako pył, należy jednak podkreślić, że jego wodoprzepuszczalność jest mniejsza niż odpowiadających pod względem uziarnienia gruntów pylastych (10^{-6} - $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Wodoprzepuszczalność żużla wielkopieczowego była dużo większa (o cztery rzędy wielkości) niż popiołu i również zależna od zagęszczenia (rys. 3). Przy zwiększaniu zagęszczenia od $I_s = 0,90$ do $0,95$ współczynnik filtracji żużla zmniejszył się o jeden rząd wielkości (od $2,3 \cdot 10^{-3}$ do $4,4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Dalsze zwiększenie zagęszczenia do $I_s = 1,00$ spowodowało nieznaczne zmniejszenie wartości współczynnika filtracji. Otrzymane wartości współczynnika filtracji charakteryzują żużel jako dobrze (przy $I_s = 0,90$)



Rys. 3. Wykresy zależności wodoprzepuszczalności badanych materiałów od wskaźnika zagęszczenia

Fig. 3. Permeability of the tested materials versus compaction index

i średnio przepuszczalny (przy $I_S = 0,95$ i $I_S = 1,00$); odpowiadają one piaskom gruboziarnistym (przy mniejszym zagęszczeniu) lub piaskom drobnoziarnistym równomiernie uziarnionym (PAZDRO i KOZERSKI 1990). Ponadto wodoprzepuszczalność żużla jest mniejsza niż odpowiadających pod względem uziarnienia gruntów naturalnych – żwirów.

Wodoprzepuszczalność mieszanki żużla wielkopieczowego z 10-procentowym dodatkiem popiołu lotnego była wyraźnie mniejsza od wodoprzepuszczalności samego żużla i również zależna od zagęszczenia. Przy zwiększaniu zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 0,95 i 1,00 wartości współczynnika filtracji zmniejszały się o kolejny rząd wielkości (odpowiednio od $1,3 \cdot 10^{-4}$ do $1,2 \cdot 10^{-5}$ m·s⁻¹ i do $1,9 \cdot 10^{-6}$ m·s⁻¹). Podane wartości współczynnika filtracji badanej mieszanki odpowiadają gruntom średnio przepuszczalnym, np. piaskom pylastym i gliniastym (przy $I_S = 0,95$ i $I_S = 1,00$).

Wodoprzepuszczalność mieszanki żużla wielkopieczowego z 20% dodatkiem popiołu lotnego była o jeden lub dwa rzędy wielkości mniejsza od wodoprzepuszczalności mieszanki z 10% dodatkiem popiołu. Wraz ze zwiększaniem zagęszczenia od 0,90 do 0,95 i 1,00, wartości współczynnika filtracji mieszanki zmniejszały się odpowiednio od około $1,1 \cdot 10^{-5}$ do $3,5 \cdot 10^{-7}$ i $2,7 \cdot 10^{-8}$ m·s⁻¹. Wartości te charakteryzują mieszankę jako odpowiadającą gruntom słabo przepuszczalnym (przy $I_S = 0,90$) i bardzo słabo przepuszczalnym, np. glina piaszczysta, glina (przy $I_S = 0,95$ i $I_S = 1,00$).

Wodoprzepuszczalność mieszanki żużla wielkopieczowego z 30-procentowym dodatkiem popiołu była mniejsza prawie o dwa rzędy wielkości przy małym zagęszczeniu

($I_S = 0,90$), o niecały rząd wielkości przy większym zagęszczeniu ($I_S = 0,95$) i tego samego rzędu wielkości przy bardzo dużym zagęszczeniu ($I_S = 1,00$), jak wodoprzepuszczalność mieszanki z 20% dodatkiem. Przy zwiększaniu zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 0,95 i 1,00 wartości współczynnika filtracji zmniejszyły się odpowiednio od około $3,4 \cdot 10^{-7}$ do $9,1 \cdot 10^{-8}$ i $3,3 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości te odpowiadają gruntem bardzo słabo przepuszczalnym.

Przedstawione wyżej wyniki badań potwierdziły ogólną prawidłowość, że zagęszczenie wywiera istotny wpływ na wodoprzepuszczalność poszczególnych materiałów, przy czym:

- wodoprzepuszczalność żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego w przedziale zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 0,95 zmniejszyła się prawie o rząd wielkości k_{10} , a dalsze zwiększanie zagęszczenia do $I_S = 1,00$ nie powodowało zmniejszania wodoprzepuszczalności,
- wodoprzepuszczalność mieszanek żużla z popiołem zmniejszała się w całym przedziale zagęszczenia od $I_S = 0,90$ do 1,00, przy czym większe zmiany wodoprzepuszczalności wystąpiły w pierwszym przedziale zagęszczenia (od $I_S = 0,90$ do 0,95) niż drugim (od $I_S = 0,95$ do 1,00). Ponadto stwierdzono, że przy dużym zagęszczeniu ($I_S = 1,00$) wodoprzepuszczalność mieszanki żużla z 20-procentowym dodatkiem popiołu była praktycznie taka sama, jak mieszanki żużla z 30-procentowym dodatkiem popiołu.

Z porównania wodoprzepuszczalności badanych materiałów o różnym zagęszczeniu wynika, że była ona wyraźnie zależna od zawartości frakcji drobnych:

- przy małym zagęszczeniu ($I_S = 0,90$) wodoprzepuszczalność materiału gruboziarnistego – żużla wielkopieczowego ($f_{\pi+i} = 2,1\%$) była największa ($2,3 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) i zmniejszała się stopniowo w mieszankach żużla z popiołem – do około $4,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (przy 30% dodatku popiołu – $f_{\pi+i} \cong 24\%$), osiągając rząd wielkości odpowiadający popiołowi ($f_{\pi+i} = 90,5\%$),
- przy większym zagęszczeniu ($I_S = 0,95$ do 1,00) wodoprzepuszczalność badanych materiałów również zmniejszała się stopniowo (od rzędu 10^{-4} do $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) w miarę zwiększania się zawartości frakcji drobnych, przy czym – podobnie jak w wyżej opisanym przypadku – wodoprzepuszczalność mieszanki żużla z 30-procentowym dodatkiem popiołu była tego samego rzędu, co wodoprzepuszczalność popiołu.

Wnioski

1. Zagęszczenie było głównym czynnikiem wpływającym na wodoprzepuszczalność badanych materiałów. Zwiększenie wskaźnika zagęszczenia I_S od 0,90 do 1,00 powodowało zmniejszenie współczynnika filtracji o jeden, dwa, a nawet prawie o trzy rzędy wielkości.

2. Uszczelnienie żużla wielkopieczowego popiołem lotnym spowodowało zwiększenie zawartości frakcji drobnych – pyłowej z ilową (około 8-krotne przy 30-procentowym dodatku popiołu) – i w efekcie znaczne zmniejszenie jego przepuszczalności hydraulicznej:

- współczynnik filtracji żużla wielkopieczowego był duży – rzędu $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy małym zagęszczeniu ($I_s = 0,90$) i $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy większym zagęszczeniu ($I_s = 0,95$ i $I_s = 1,00$),
- po uszczelnieniu popiołem współczynnik filtracji był znacznie mniejszy – rzędu $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy 10-procentowym dodatku popiołu i małym zagęszczeniu ($I_s = 0,90$) oraz $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy 30-procentowym dodatku popiołu i dużym zagęszczeniu ($I_s = 0,95$ i $I_s = 1,00$).

3. Można przyjąć, że 20% dodatek popiołu do żużla wielkopieczowego jest wystarczający do jego uszczelnienia. Przy stosowanym zwykle w konstrukcjach ziemnych wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$ wodoprzepuszczalność mieszanki żużla wielkopieczowego z 20-procentowym dodatkiem popiołu była zbliżona do wodoprzepuszczalności mieszanki żużla z 30-procentowym dodatkiem popiołu, a przy wyższym wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$ wodoprzepuszczalność obu mieszanek była praktycznie taka sama.

4. Mieszanki żużla wielkopieczowego z popiołem lotnym, jako materiały kompozytowe, mogą mieć zastosowanie jako materiały konstrukcyjne o korzystnych parametrach geotechnicznych, w szczególności charakteryzujących ich uziarnienie, zagęszczalność, wodoprzepuszczalność i wytrzymałość na ścinanie. Mogą być stosowane zarówno do budowy nasypów komunikacyjnych (do 10% dodatku popiołu), jak i hydrotechnicznych (do 20-30% dodatku popiołu). Potwierdzają to wyniki wcześniejszych badań (w tym ściśliwości i nośności), prowadzonych w Katedrze Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie na żużlach wielkopieczowych i ich mieszanek z popiołami (ZAWISZA 2006, ZAWISZA i SUKCHAROWSKI 2006, GRUCHOT i ZAWISZA 2007 a i b, ZAWISZA i STAROWICZ 2007, ZAWISZA i KAWALA 2009, ZAWISZA i RYBA 2010). Dla oceny przydatności przedmiotowych materiałów do celów budownictwa ziemnego należy, oprócz badań właściwości geotechnicznych, określić ich oddziaływanie na środowisko przyrodnicze.

Literatura

- FURTAK A., 2009. Wpływ zagęszczenia na wodoprzepuszczalność odpadów poenergetycznych. Maszynopis. UR im. Hugona Kołłątaja, Kraków.
- GRUCHOT A., ZAWISZA E., 2007 a. Badania parametrów geotechnicznych wybranych odpadów przemysłowych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego. *Przegl. Gór.* 10: 26-32.
- GRUCHOT A.T., ZAWISZA E., 2007 b. Zagęszczalność a nośność wybranych odpadów powęglowych i pohutnicznych. *Przegl. Gór.* 11: 26-30.
- KOWALÓW M., 2000. Wpływ zabezpieczeń inżynierskich na zmianę warunków hydraulicznych warunków filtracji ze składowisk odpadów. *Pr. Nauk. P. Szczec.* 552, Kated. Geotech. 6.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990. *Hydrologia ogólna*. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-88/B-04481. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- ROSIK-DULEWSKA CZ., 2007. *Podstawy gospodarki odpadami*. Ekoinżynieria, Lublin.
- SKARŻYŃSKA K.M., 1997. *Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej*. Wyd. AR, Kraków.
- www.min-pan.krakow.pl/Wydawnictwa/GSM211/galos-uliasz-bochenczyk.pdf

Zawisza E., Kamińska K., Janusz I., 2011. Wodoprzepuszczalność żużli wielkopieczowych, popiołów lotnych oraz ich mieszanek. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 5, #102.

- ZADROGA B., OLAŃCZUK-NEYMAN K., 2001. Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- ZAWISZA E., 2001. Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. *Zesz. Nauk. AR Krak. Rozpr.* 280.
- ZAWISZA E., 2006. Wpływ zagęszczenia i wilgotności na wytrzymałości na ścinanie wybranych odpadów przemysłowych i gruntu mineralnego. *Przegl. Gór.* 11: 27-32.
- ZAWISZA E., KAWALA J., 2007. Wpływ dodatku popiołu lotnego na zagęszczalność i wytrzymałość na ścinanie żużla wielkopieczowego. W: *Gruntowe materiały budowlane w inżynierii lądowej i wodnej. Monografia wydana z okazji 70-lecia profesora Stanisława Pisarczyka.* Pr. Nauk. P. Warsz. Inż. Środ. 54: 141-151.
- ZAWISZA E., KAWALA J., 2009. Wytrzymałość na ścinanie mieszanek popiołu lotnego z żużlem wielkopieczowym. W: *Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych.* Red. E. Dembicki, M.K. Kumor, Z. Lechowicz. Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz: 311-318.
- ZAWISZA E., RYBA R., 2010. Wpływ uszczelnienia żużli wielkopieczowych popiołami lotnymi na ich ścisłość. *Przegl. Gór.* 5: 45-50.
- ZAWISZA E., STAROWICZ G., 2007. Wytrzymałość na ścinanie odpadów pohnicznych w świetle badań w aparatach bezpośredniego ścinania. *Zesz. Nauk. P. Śl. Bud.* 111: 435-447.
- ZAWISZA E., SUKNAROWSKI M., 2006. Badania wpływu zagęszczenia i nawodnienia na ścisłość kruszywa z żużla wielkopieczowego. *Przegl. Gór.* 7-8: 82-86.

WATER PERMEABILITY OF BLAST FURNACE SLAG, FLY ASHES AND THEIR MIXTURES

Summary. The paper presents results of water permeability tests of chosen blast furnace slag, fly ashes and their mixtures. The test material was: blast furnace slag (0-31.5 mm) from the main slag heap Pleszów of the steelworks ArcelorMittal Poland, fly ash from the power station Skawina S.A. and mixtures of the slag with the ash, where the contents of the ash was 10, 20 and 30% (by weight). It was stated, that the water permeability of the tested materials depended mainly on compaction. The increase of the compaction index (I_s) from 0.90 to 1.00, caused the decrease of the permeability coefficient by one, two or even about three orders of magnitude. The addition of the fly ash to the blast furnace slag resulted in its sealing and, as a consequence, the significant decrease of the permeability coefficient: from the order of 10^{-3} - 10^{-4} $m \cdot s^{-1}$ for the slag to 10^{-7} - 10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ for the slag with 30% addition of the ash.

Key words: industrial wastes, blast furnace slag, fly ashes, geotechnical properties, water permeability

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Eugeniusz Zawisza, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kollątaja w Krakowie, Al. Mickiewicza 24/28, 31-120 Kraków, Poland, e-mail: kiwig@ur.krakow.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

13.06.2011

Do cytowania – For citation:

*Zawisza E., Kamińska K., Janusz I., 2011. Wodoprzepuszczalność żużli wielkopieczowych, popiołów lotnych oraz ich mieszanek. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 5, #102.*