



Wykorzystanie kompozytów z odpadów powęglowych i popiołu lotnego do budowy wałów przeciwpowodziowych

Utilization of post coal waste composites and fly ash for levee construction

Dr inż. Andrzej Gruchot^{*)}

Treść: W pracy przedstawiono wyniki badań wodoprzepuszczalności nieprzepalonych odpadów powęglowych pochodzących ze składowiska KWK „Rydultowy-Anna”, popiołu lotnego ze zsypu z elektrofiltrów Elektrowni „Skawina” oraz ich kompozytów przy 10, 20 i 30-procentowym dodatku popiołów w stosunku do suchej masy odpadów powęglowych. W oparciu o uzyskane wyniki badań wykonano obliczenia filtracji wody przez obwałowanie wykonane z kompozytów gruntów antropogenicznych o wysokości 6,0 m bez drenażu i uszczelnienia. Zakres obliczeń obejmował określenie natężenia przepływu przez korpus nasypu, czas ustalenia się przesiąku oraz czas, po którym ustabilizuje się przepływ filtracyjny. Stwierdzono znaczące ograniczenie wodoprzepuszczalności kompozytów odpadów powęglowych z popiołem lotnym w stosunku do odpadów powęglowych. Współczynnik filtracji kompozytów zmniejszył się, uzyskując wartości zbliżone do współczynnika filtracji spoistych gruntów mineralnych. Przeprowadzone obliczenia filtracyjne potwierdzają celowość stosowania popiołów lotnych jako składnika kompozytów gruntów antropogenicznych stosowanych w budownictwie hydrotechnicznym. Najkrótszy czas przesiąku wody przez obwałowanie, jak również jego ustalenie stwierdzono dla obwałowania z odpadów powęglowych. Zwiększenie dodatku popiołu spowodowało zmniejszenie natężenia przepływu o 5 rzędów wielkości w stosunku do odpadów powęglowych.

Abstract: This paper presents the results of permeability tests of unburnt post coal waste from KWK “Rydultowy-Anna” landfill, fly ash from “Skawina” Power Plant and their composites with 10%, 20% and 30% addition of fly ash in relation to dry mass of the colliery spoils. Basing on the obtained results, calculations of water filtration through a 6.0 m high embankment made from composites of anthropogenic soils without drainage or sealing were performed. Flow rate through the body of the embankment, time for percolations to settle and time for filtration to reach steady state were calculated. A significant reduction of water permeability of composite colliery spoils with fly ash in comparison with colliery spoils was noticed. Percolation coefficient of composites decreased and it reached values close to the ones of mineral cohesive soils. The calculations showed that fly ash should be used as a component in anthropogenic soils composites used in hydraulic engineering. The shortest time for percolations to settle as well as for filtration to reach steady state was found for the embankments made of coal waste. Increase in the addition of ash caused a decrease in the flow rate by 5 orders of magnitude compared to coal waste.

Słowa kluczowe:

odpady powęglowe, popiół lotny, kompozyty, współczynnik filtracji

Key words:

post coal wastes, fly ash, composites, percolation coefficient

1. Wprowadzenie

Wały przeciwpowodziowe są zaliczane do budowli hydrotechnicznych i stanowią ochronę bierną przed skutkami powodzi [19] i dlatego muszą spełniać wiele wymogów. Wymagania te odnoszą się głównie do wymiarów korpusu obwałowania, które zależą od klasy technicznej oraz rodzaju materiału użytego do jego budowy. Konsekwencje źle dobranych materiałów do budowy wałów powodują zwiększoną ilość filtrującej wody, a co za tym idzie problem ze statecznością tego typu obiektów. W Polsce istnieje około 8,5 tys. km wałów przeciwpowodziowych, które w znacznej mierze charakteryzują się długim okresem eksploatacji [5]. Poziom stanu technicznego wałów wpływa na ochronę ludności

zasiedlającej doliny rzeczne. Dlatego ważnym aspektem ich utrzymania są prace konserwacyjne. Poprawę stanu technicznego obwałowań można uzyskać, projektując między innymi ich rozbudowę i podwyższenie, a także dogęszczenie i uszczelnienie korpusu [4]. Ograniczenie filtracji lub jej wyeliminowanie przez korpus obwałowania zmniejszy ewentualne zmiany strukturalne w samej budowlu [2].

Do rozbudowy wałów można stosować materiały alternatywne w stosunku do gruntów mineralnych. Takimi materiałami mogą być kompozyty z odpadów powęglowych i popiołów lotnych. Odpady powęglowe, jako materiał gruboziarnisty cechują się wysoką nośnością i znacznym ciężarem, a więc gwarantują stateczność obwałowania, natomiast popiół lotny zwiększa ich szczelność ograniczając przepuszczalność. Takie podejście powoduje także ograniczenie objętości składowanych materiałów i wpływu składowisk na środowisko naturalne, co stanowi działanie proekologiczne.

^{*)} Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Odpady powęglowe stanowią mieszaninę płonnej skały karbońskiej o dość złożonym składzie petrograficznym i co za tym idzie, dużej zmienności właściwości geotechnicznych [7, 13]. Dlatego ich wykorzystanie wymaga właściwego rozpoznania geotechnicznego i przyjęcia właściwej technologii ich wbudowywania [16, 9]. Odpady poenergetyczne (popioły lotne, mieszaniny popiołowo-żużlowe i inne) powstają ze spalania węgla kamiennego i brunatnego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Są materiałem o szerokim zakresie uziarnienia i dużej zmienności właściwości geotechnicznych. Jest to uzależnione od rodzaju zastosowanego paliwa, metody spalania oraz sposobu odbioru, transportu i składowania odpadów. Największym odbiorcą popiołu lotnego jest przemysł budowlany oraz cementownie [8], a materiał grubszy jest stosowany w budownictwie drogowym [3]. Należy jednak zaznaczyć, że materiały te muszą przejść pozytywną weryfikację w aspekcie ich właściwości geotechnicznych. Popioły lotne są również wykorzystane do wzmocnienia słabonośnego podłoża poprzez jego stabilizację lub jego doszczelniania [10, 14, 15].

2. Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu dodatku popiołu lotnego na zmianę właściwości geotechnicznych odpadów powęglowych w aspekcie ich wykorzystania, jako kompozytów z gruntów antropogenicznych do wznoszenia nasypów budownictwa hydrotechnicznego. Zakres badań obejmował oznaczenie charakterystyki geotechnicznej oraz współczynnika filtracji nieprzepalonych odpadów powęglowych ze składowiska KWK „Rydułtowy-Anna”, popiołu lotnego ze zsypu z elektrofiltrów Elektrowni „Skawina” oraz ich kompozytów przy 10, 20 i 30-procentowym udziale popiołów w stosunku do suchej masy odpadów powęglowych.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczenia oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia odpadów powęglowych oznaczono metodą sitową dla ziarn i cząstek większych od 0,063 mm oraz areometryczną dla cząstek mniejszych od 0,063 mm. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości 2,2 dm³ dla odpadów powęglowych i ich kompozytów z popiołami lotnymi oraz 1,0 dm³ dla popiołów lotnych, przy energii zagęszczania 0,59 J · cm⁻³.

Współczynnik filtracji odpadów powęglowych i ich kompozytów z popiołami oznaczono w średniowymiarowym permeametrze. Próbkę o średnicy i wysokości po 36 cm były formowane bezpośrednio w aparacie, przez zagęszczanie materiału o wilgotności zbliżonej do optymalnej w 6 warstwach o wysokości 6,0 cm każda, do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$. Oznaczenie współczynnika filtracji przeprowadzono po przefiltrowaniu się wody przez próbkę i ustabilizowaniu przepływu. Badanie polegało na pomiarze objętości przefiltrowanej wody przez próbkę przy stałym spadku hydraulicznym, w stałych odstępach czasu. Pomiar przeprowadzono przy przepływie wody z dołu do góry (w celu wyeliminowania powietrza) i z góry do dołu próbki. Jako wynik przyjęto wartość średnią z obydwo pomiarów. Wartości współczynnika filtracji k_t obliczono ze wzoru

$$k_t = \frac{Q}{A \cdot i \cdot t} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- Q – wydatek filtracji, m³,
- A – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, m²,
- i – spadek hydrauliczny, -,
- t – czas trwania pomiaru, s.

Współczynnik filtracji popiołu lotnego oznaczono w edometrze, na próbkach o wysokości 2,0 cm i średnicy 6,5 cm. Popiół o wilgotności zbliżonej do optymalnej zagęszczano bezpośrednio w pierścieniu aparatu do uzyskania wskaźnika zagęszczenia: $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Oznaczenie polegało na pomiarze przepływu wody z dołu do góry próbki w warunkach zmiennego spadku hydraulicznego. Przygotowane próbki umieszczano w edometrach, a następnie przykładano obciążenie o wartości 12,5 kPa. Pomiar filtracji rozpoczęto po całkowitym przepływie wody przez próbkę. Badania polegały na rejestracji zmian poziomu wody w rurce aparatu w jednostce czasu. Współczynnik filtracji (k_t) obliczano ze wzoru

$$k_t t = a(l/A) \left((t_2 - t_1) \cdot \ln h_1 / h_2 \right) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2)$$

gdzie:

- a – pole przekroju rurki piezometrycznej, m²,
- l – wysokość próbki, m,
- A – pole przekroju próbki, m²,
- $(t_2 - t_1)$ – czas trwania badania, s,
- h_1 – wysokość słupa wody w rurce piezometrycznej o czasie t_1 , m,
- h_2 – wysokość słupa wody w rurce piezometrycznej o czasie t_2 , m.

Uzyskane wartości współczynnika filtracji k_t przeliczono do umownej temperatury wynoszącej 10°C k_{10} według wzoru

$$k_{10} = \frac{k_t}{0,7 + 0,03 \cdot T} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

- T – temperatura wody w trakcie badania, °C.

W oparciu o uzyskane wyniki badań wykonano obliczenia filtracji wody przez obwałowanie wykonane z kompozytów gruntów antropogenicznych. Przyjęto, że wał o wysokości 6,0 m nie posiada drenażu i uszczelnienia i jest posadowiony na podłożu nieprzepuszczalnym. Zakres obliczeń obejmował określenie natężenia przepływu przez korpus nasypu, czas ustalenia się przesiąku oraz czas, po którym ustabilizuje się przepływ filtracyjny.

Zakładając warunki filtracji nieustalonej i stosując zmodyfikowany wzór Thiema (4) [11], wyznaczono czas T , po którym przesiąki dojdą do stopy skarpy odpowietrznej korpusu obwałowania na skutek nagłego podniesienia się wody w międzywale (rys. 1a).

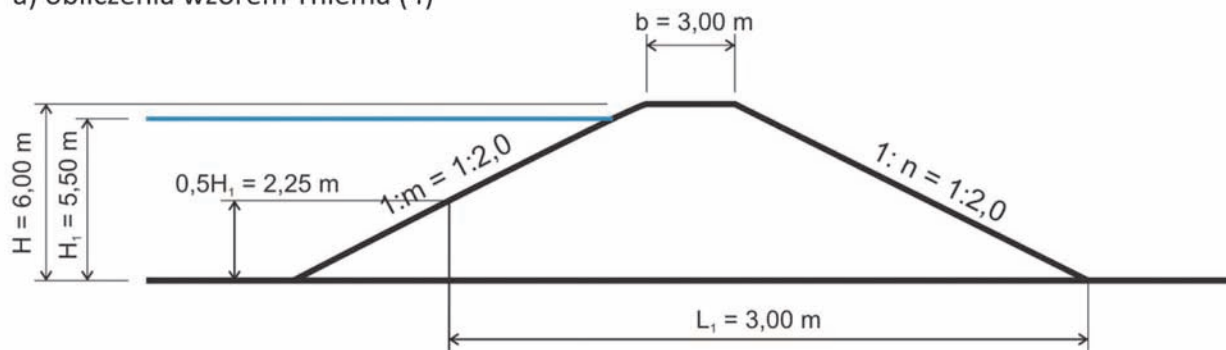
$$T = \frac{n_p \cdot L_1^2}{3k \cdot H_1} \text{ doby} \quad (4)$$

- n – porowatość gruntu w korpusie, [-],
- w – wilgotność gruntu w korpusie (w wartościach niemianowanych),
- ρ_s, ρ_w – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego i wody, g · cm⁻³,
- k – współczynnik filtracji gruntu korpusu, m · s⁻¹
- H_1 – maksymalna wysokość wody przy wale w czasie wezbrania, m
- L_1 – zastępcza długość podstawy korpusu, m.

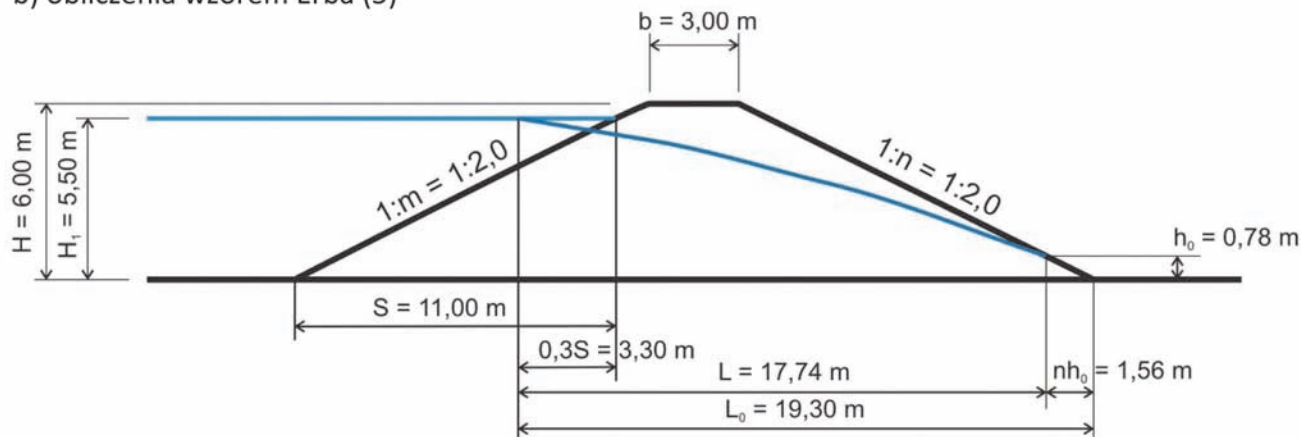
Następnie zakładając, że czas wezbrania będzie dłuższy niż czas ustalenia się natężenia przepływu, w oparciu o równanie Erba (5) [11], wyznaczono czas T_p , po którym nastąpi ustalenie się natężenia przepływu filtracyjnego (rys. 1b),

$$T_p = \frac{n_p \cdot L_1^2}{k \cdot H_1} \text{ doby} \quad (5)$$

a) obliczenia wzorem Thiema (4)



b) obliczenia wzorem Erba (5)



Rys. 1. Schemat do obliczeń filtracji przez nasyp kompozytów gruntów antropogenicznych

Fig. 1. Scheme for calculation of percolation through the embankments made of anthropogenic soils

Natężenie przepływu obliczono przy założeniu filtracji ustalonej przy długotrwałym piętrzeniu wody o wysokości 5,5 m, z równania [b]

$$T = \frac{k}{2} \cdot \frac{H_1^2 - h_0^2}{L_0 - n \cdot h_0} \quad [m^2 \cdot s^{-1} \cdot mb^{-1}] \quad (6)$$

gdzie (oznaczenia dla równania (4, 5, 6)):

n_p – objętość porów wypełnionych powietrzem, [-]

$$n_p = n - \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot w \quad (7)$$

L, L_0, H, n – w oparciu o rysunek 1b, przy czym

$$h_0 = \frac{H^2}{2L_0} \quad (8), (9)$$

$$L = L_0 - n \cdot h_0$$

3. Wyniki badań i ich analiza

3.1. Właściwości fizyczne

Uziarnienie odpadów powęglowych odpowiadało kilkufrakcyjnym żwirom średnim (tab. 1). Udział frakcji żwirowej wynosił 88%, frakcji piaskowej blisko 9%, pyłowej ponad 2%, a ilowej ponad 1% (rys. 2). W przypadku popiołów lotnych przeważała frakcja pyłowa, której zawartość wynosiła ponad 86%, udział frakcji piaskowej wynosił 8%, a ilowej ponad 5%. Pod względem geotechnicznym popioły zostały sklasyfikowane jako jednofrakcyjny pył.

W składzie uziarnienia kompozytów dominowała frakcja żwirowa, a jej zawartość zmniejszała się wraz ze wzrostem

dotądki popiołu i wynosiła od 74% przy dodatku 10% do około 64% przy dodatku 30%. Zawartość frakcji piaskowej zmniejszyła się od 14 do 11%, a pyłowej i ilowej zwiększyła się odpowiednio od 10 do 18% i od 2 do blisko 7% wraz ze wzrostem dodatku popiołu (tab. 1). Zgodnie z nomenklaturą geotechniczną kompozyty odpadów powęglowych z dodatkiem 10% popiołów odpowiadały żwirom średnim, z dodatkiem 20% - żwirom pylastym, a z dodatkiem 30% - żwirom ilastym. Wskaźnik różnorodności wynosił od 400 do 1481 co pozwoliło określić kompozyty jako wielofrakcyjne.

Gęstość właściwa szkieletu odpadów powęglowych wynosiła $2,37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a popiołu lotnego około $2,24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. W przypadku kompozytów odpadów powęglowych z popiołem gęstość właściwa szkieletu wynosiła od $2,27$ do $2,29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

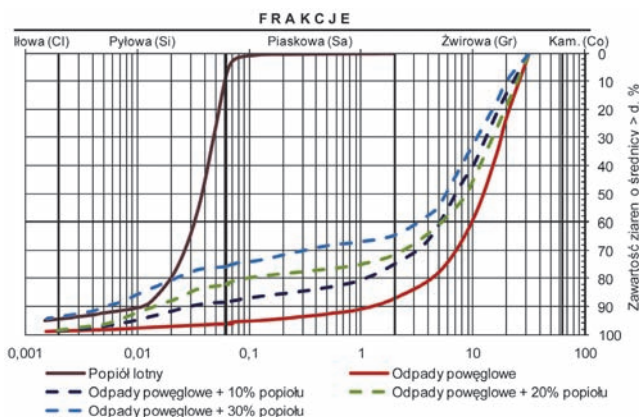
Ze względu na zawartość cząstek mniejszych od $0,075$ i $0,02 \text{ mm}$ (tab. 1) popioły lotne zaliczono do gruntów wysadziniowych, a odpady powęgłowe do gruntów niewysadziniowych [17]. W przypadku kompozytów stwierdzono, że były to materiały wątpliwe pod względem wysadziniowości.

3.2. Parametry zagęszczalności

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadów powęglowych była wysoka i wynosiła $1,83 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, a popiołu lotnego znacznie niższa – $1,12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (tab. 1). Dodatek popiołu w ilości 10% do odpadów powęglowych spowodował wzrost parametru o nieco ponad $0,1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ w stosunku do odpadów bez dodatku popiołu. Kolejne zwiększanie dodatku popiołu do 20 i 30% w odpadach powęglowych spowodowało zmniejszenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu o ponad $0,2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ w stosunku do wartości najwyższej uży-

Tabela 1. Skład uziarnienia i podstawowe właściwości fizyczne badanych materiałów
Table 1. Graining and basic physical properties of the tested materials

Parametr	Odpady powęglowe	Popiół lotny	Kompozyt odpadów powęglowych z popiołem lotnym w ilości:		
			10%	20%	30%
Zawartość frakcji, %					
– żwirowa, Gr: $63 \div 2$ mm	88,0		74,0	71,5	64,0
– piaskowa, Sa: $2 \div 0,063$ mm	8,5	8,0	14,0	10,5	11,5
– pyłowa, Si: $0,063 \div 0,002$ mm	2,3	86,5	10,0	16,0	18,0
– ilowa, Cl: $< 0,002$ mm	1,2	5,5	2,0	2,0	6,5
Nazwa wg [18]	MGr	Si	MGr	siGr	clGr
Wskaźnik różnoziarnistości, CU [-]	11,1	3,6	400	667	1481
Zawartość cząstek:					
– $\leq 0,075$ mm	4,4	98,0	12,3	19,6	25,2
– $\leq 0,02$ mm	3,5	20,5	8,2	12,0	19,5
Gęstość właściwa szkieletu, $\rho_s, g \cdot cm^{-3}$	2,37	2,24	2,27	2,28	2,29
Wilgotność optymalna, $w_{opt}, \%$	7,80	35,0	9,60	12,70	15,20
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, $\rho_{ds}, g \cdot cm^{-3}$	1,83	1,12	1,95	1,865	1,725



Rys. 2. Krzywe uziarnienia badanych materiałów odpadowych oraz ich kompozytów

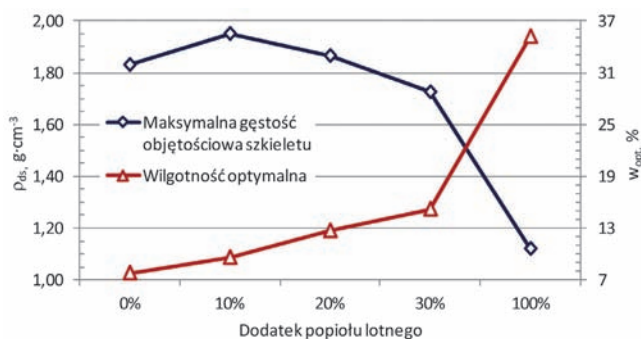
Fig. 2. Graining curves of the tested waste materials and their composites

skanej przy 10% dodatku popiołu i $0,1 g \cdot cm^{-3}$ w stosunku do odpadów bez dodatku popiołu (rys. 3).

Wilgotność optymalna odpadów powęglowych wynosiła blisko 8% i była 4,5-krotnie niższa od wilgotności optymalnej popiołu lotnego (około 35%). Dodatek popiołu lotnego od 10 do 30% spowodował prawie 2-krotne zwiększenie analizowanego parametru w stosunku do odpadów powęglowych bez dodatku popiołu (rys. 3).

3.3. Współczynnik filtracji

Uzyskane wyniki badań wskazują, że największe wartości współczynnika filtracji występowały na początku badania,



Rys. 3. Wpływ dodatku popiołu lotnego na parametry zagęszczenia odpadów powęglowych

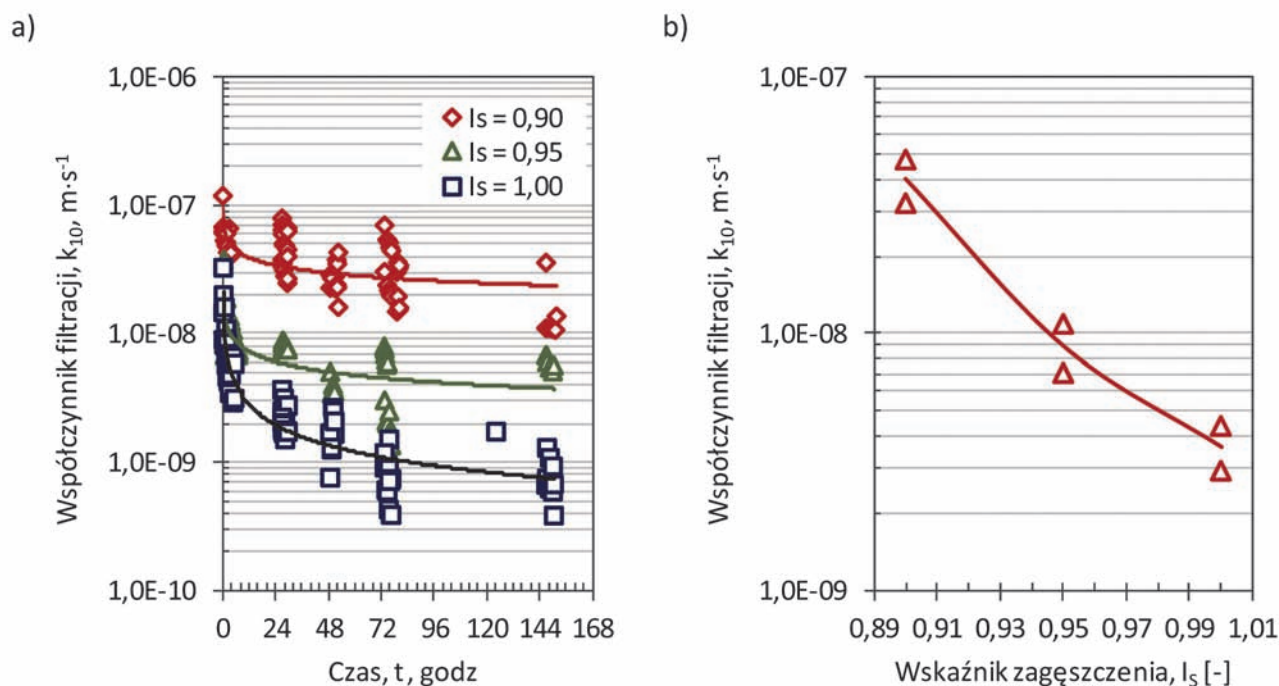
Fig. 3. Influence of the addition of fly ash on the parameters of post coal waste compactibility

natomiast w miarę upływu czasu jego wartości zmniejszyły się w wyniku stabilizacji przepływu wody przez próbkę. Zależność ta była obserwowana głównie dla próbek popiołu lotnego (rys. 4) oraz odpadów powęglowych bez i z 10-procentowym dodatkiem popiołu (rys. 5). Dla kompozytów z 20 i 30-procentowym udziałem popiołu nie stwierdzono istotnych zmian współczynnika filtracji wraz z czasem trwania badania.

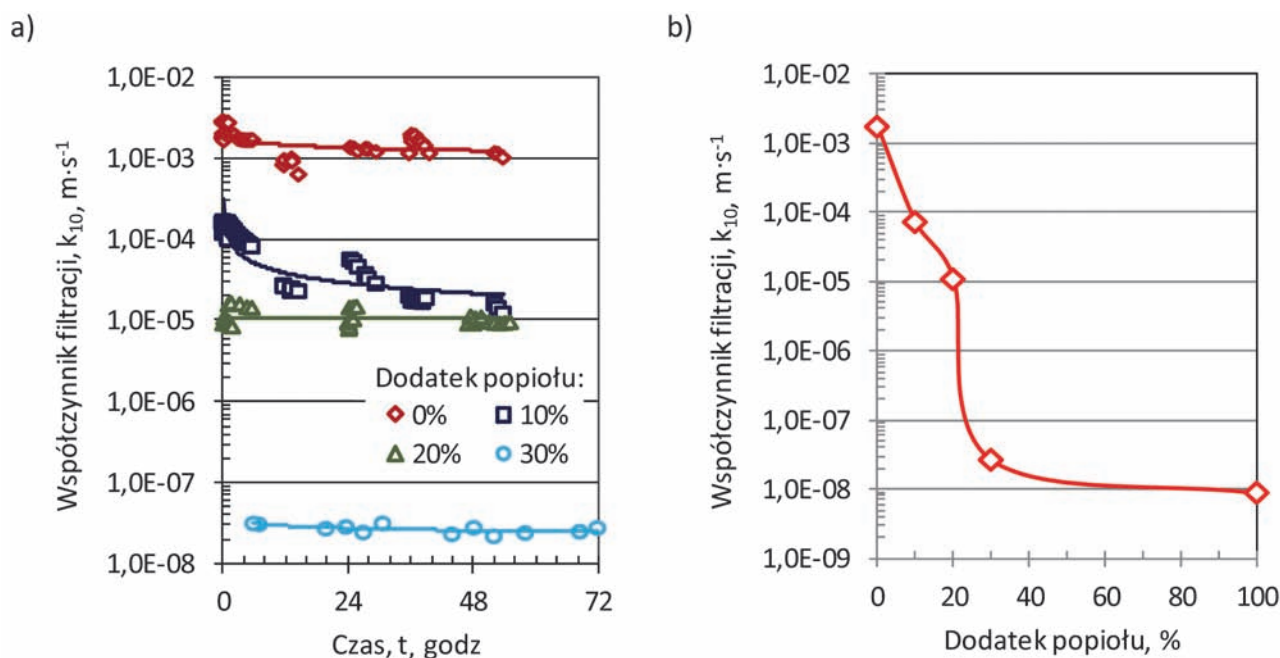
Wzrost zagęszczenia popiołu lotnego od $I_s = 0,90$ do 1,00 spowodował zmniejszenie współczynnika filtracji o jeden rząd wielkości, od $3,99 \cdot 10^{-8} m \cdot s^{-1}$ do $3,66 \cdot 10^{-9} m \cdot s^{-1}$ (tab. 2). Uzyskane wartości wskazują, że był to materiał nieprzepuszczalny i pod tym względem odpowiadał glinom i ilom [12].

Tabela 2. Zestawienie średnich wartości współczynnika filtracji badanych materiałów
Table 2. Summary of average values of percolation coefficient of the tested materials

Wskaźnik zagęszczenia, $I_s [-]$	Kierunek przepływu wody w próbce	Współczynnik filtracji $k_{10}, m \cdot s^{-1}$				
		Popiół lotny	Odpady powęglowe 10%	Kompozyt odpadów powęglowych z popiołem lotnym w ilości		
				20%	30%	
0,90	z dołu do góry	$3,99 \cdot 10^{-8}$	–	–	–	–
0,95	z dołu do góry	$8,96 \cdot 10^{-9}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$
	z góry do dołu	–	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
	średnia	$8,96 \cdot 10^{-9}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$7,25 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-8}$
1,00	z dołu do góry	$3,66 \cdot 10^{-9}$	–	–	–	–



Rys. 4. Zależność współczynnika filtracji popiołu lotnego od czasu trwania badania (a) i zagęszczenia (b)
 Fig. 4. Relationship between the percolation coefficient of fly ash and test duration (a) and compacting (b)



Rys. 5. Wpływ czasu trwania badania (a) i dodatku popiołu (b) na współczynnik filtracji kompozytów z odpadów powęglowych i popiołu lotnego przy wskaźniku zagęszczenia $I_S = 0,95$

Fig. 5. Influence of test duration (a) and fly ash addition (b) on the percolation coefficient of post coal waste (b) composites and fly ash with compacting indicator $I_S = 0,95$

Współczynnik filtracji odpadów powęglowych był rzędu 10^{-3} m·s⁻¹, a więc odpowiadał przepuszczalnym gruntom mineralnym (rumosze, żwiry, piaski gruboziarniste) [12]. Dodatek popiołu do odpadów powęglowych spowodował znaczne zmniejszenie współczynnika filtracji. W przypadku kompozytów z 10 i 20-procentowym udziałem popiołu było to zmniejszenie średnio o 2 rzędy wielkości (odpowiada to gruntom średnio przepuszczalnym – piaski drobnoziarniste, pylaste i gliniaste), a w przypadku kompozytu z 30-pro-

centowym udziałem popiołu o 5 rzędów wielkości (grunty półprzepuszczalne - gliny, namuły) w stosunku do odpadów powęglowych bez dodatku popiołu. Można więc stwierdzić, że uzyskano efekt doszczelniania odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Należy podkreślić, że kompozyt z 30-procentowym udziałem popiołu jest praktycznie nieprzepuszczalny, a wartości współczynnika filtracji były zbliżone do uzyskanych dla popiołu lotnego (rys. 5b).

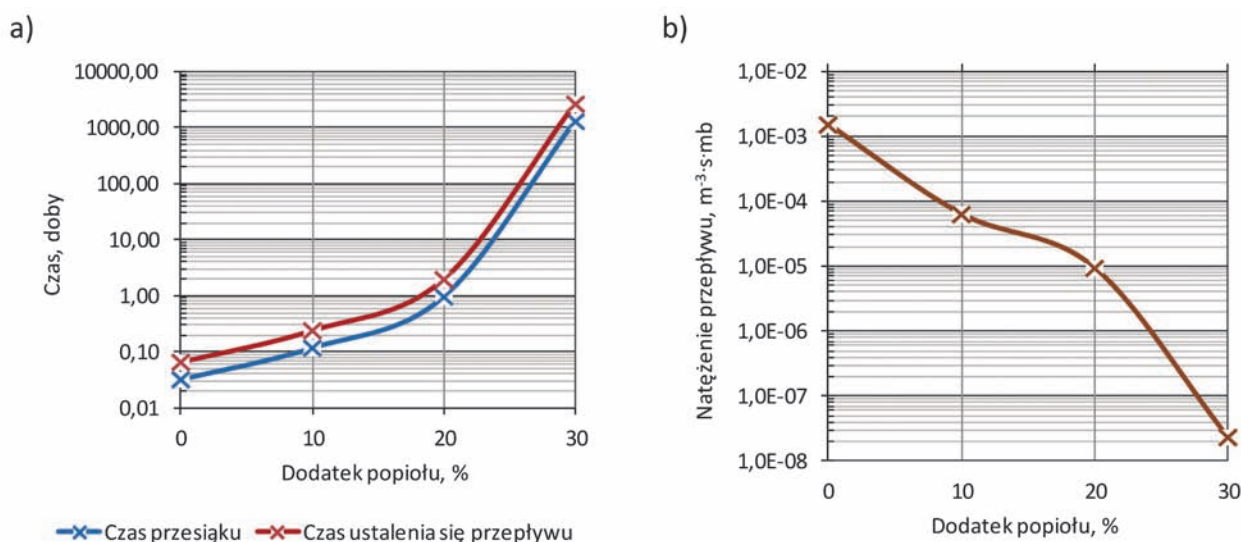
4. Wyniki obliczeń i ich analiza

Przeprowadzone obliczenia potwierdzają celowość stosowania popiołów lotnych jako składnika kompozytów gruntów antropogenicznych stosowanych w budownictwie hydrotechnicznym. Najkrótszy czas przesiąku wody przez obwałowanie, jak również jego ustalenie, stwierdzono dla obwałowania z odpadów powęglowych (tab. 3). Dodatek popiołu lotnego do odpadów powęglowych od 10 do 30% spowodował znaczne wydłużenie tych czasów (rys. 6a). Należy zaznaczyć, że czas przesiąku czy też ustalenia się przepływu jest na tyle duży, że przekracza czas wystąpienia przepływu wezbraniowego dla większości polskich rzek [1].

rozwiązaniem korzystnym, pozwalającym na zmniejszenie pozyskiwania ziemnych surowców naturalnych, a także ograniczenie rozbudowy składowisk, na których deponowane są te odpady. Jak wykazały prezentowane badania, tworzenie, tego typu kompozytów ogranicza wodoprzepuszczalność odpadów powęglowych. Współczynnik filtracji kompozytów z dodatkiem popiołu w znaczący sposób zmniejszył się, uzyskując wartości zbliżone do współczynnika filtracji spoiстых gruntów mineralnych. Przeprowadzone obliczenia filtracyjne przez obwałowanie wykonane z tego typu kompozytów potwierdzają celowość ich stosowania w budownictwie hydrotechnicznym.

Tabela 3. Zestawienie wyników przeprowadzonych obliczeń filtracyjnych
Table 3. Summary of the results of percolation calculations

Dodatek popiołu %	Współczynnik filtracji $m \cdot s^{-1}$	Czas przesiąku wody przez obwałowanie, T		Czas ustalenia się przepływu, T_p		Natężenie przepływu, q $m^3 \cdot s^{-1} \cdot mb^{-1}$
		h	doby	h	doby	
0	$1,74 \cdot 10^{-3}$	0,78	0,03	1,58	0,07	$1,52 \cdot 10^{-3}$
10	$7,25 \cdot 10^{-5}$	2,84	0,12	5,79	0,24	$6,34 \cdot 10^{-5}$
20	$1,08 \cdot 10^{-5}$	23,10	0,96	47,13	1,96	$9,42 \cdot 10^{-6}$
30	$2,68 \cdot 10^{-8}$	31058,12	1294,09	63382,08	2640,92	$2,35 \cdot 10^{-8}$



Rys. 6. Wpływ dodatku popiołu lotnego do odpadów powęglowych na czas przesiąku i ustalenia się przepływu wody w obwałowaniu (a) i jego natężenia (b)

Fig. 6. Influence of the addition of fly ash to post-coal wastes on the percolation period and settlement of water flow through the embankment (a) and its intensity (b)

Jak wykazały obliczenia, czas przesiąku czy też ustalenia się przepływu zależy od współczynnika filtracji zastosowanych materiałów, który wcześniej, jak już przedstawiono, zależy od procentowego dodatku popiołu.

Podobne zależności stwierdzono w obliczeniach natężenia przepływu wody przez obwałowanie wykonane z przedmiotowych kompozytów. Zwiększenie dodatku popiołu spowodowało zmniejszenie natężenia przepływu o 5 rzędów wielkości w stosunku do odpadów powęglowych (tab. 3, rys. 6b).

5. Podsumowanie

Zastosowanie kompozytów odpadów powęglowych z popiołami lotnymi w budownictwie hydrotechnicznym jest

Artykuł powstał w ramach badań finansowanych z Własnego Funduszu Stypendialnego dla Pracowników Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja w Krakowie.

Literatura

1. Bednarczyk S., Jarzębińska T., Mackiewicz S., Włoszyn E.: Vademecum ochrony przeciwpowodziowej. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Gdańsk 2006.
2. Bolt A.: Śródlądowe budowle wodne - aspekty geotechniczne. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła - Kraków 2009.
3. Borowski G.: Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. „Inżynieria Ekologiczna” 2010, nr 22, 52-62.

4. *Borys M., Mosiej K., Topolnicki M.*: Projektowanie i wykonawstwo pionowych przegród przeciwnieprzepuszczalnych z zawieszin twardniejących w korpusach i podłożu wałów przeciwpowodziowych. Wydawnictwo IMUZ, 2006.
5. *Borys M.*: Przepisy i wymogi oraz aktualny stan obwałowań przeciwpowodziowych w Polsce. „Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie” 2007, t. 7, z. 2a, 25-44.
6. *Fanti K., Fiedler K., Kowalewski J., Wójcicki S.*: Budowle piętrzące. Arkady, Warszawa 1972.
7. *Filipowicz P., Borys M.*: Wykorzystanie odpadów przemysłowych do budowy i umacniania wałów przeciwpowodziowych. Rocznik „Ochrona Środowiska” 2008, nr 10, 633-644.
8. *Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.*: Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2005, nr 1, 23-42.
9. *Gruchot A., Zawisza E.*: Badania parametrów geotechnicznych wybranych odpadów przemysłowych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego. „Przeгляд Górnicy” 2007, nr 10, 26-32.
10. *Kraszewski C., Pachowski J.*: Popioły w drogownictwie, wymagania i zastosowanie. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary 2003, 13+22.
11. *Król P., Mioduszewski W., Wolski W., Żbikowski A.*: Wały przeciwpowodziowe – wytyczne instruktażowe projektowania. Filtracja. Zał. 3. (Opracowanie zbiorowe pod kierunkiem A. Żbikowskiego). Melioracje Rolne, 1983, 2-3.
12. *Pazdro Z.*: Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1983.
13. *Pieczyrak J.*: Przydatność odpadów górnictwa węgla kamiennego w inżynierii lądowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, „Inżynieria Środowiska” 2007, nr 54, 101-108.
14. *Szydło A.*: Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żużlowych z Elektrociepłowni Wrocław w budownictwie drogowym. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary 2003, 93+101.
15. *Zawisza E., Pomietło M.*: Wodoprzepuszczalność mieszanek odpadów hutniczych i energetycznych. „Przeгляд Górnicy” 2011, nr 1-2, 68-71.
16. *Żydróż T.*: Badania właściwości geotechnicznych nieprzepalonych odpadów powęglowych z kopalni „Janina”. „Przeгляд Górnicy” 2010, nr 1-2, 38-42.
17. PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
18. PN-EN-ISO-14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikacji. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa.
19. Dz.U. z 1996 r. Nr 21 poz. 111, Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej.