

WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE POPIOŁÓW LOTNYCH W ZALEŻNOŚCI OD STREFY ODPYLANIA

Eugeniusz Zawisza, Natalia Kuska

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Artykuł zawiera wyniki badań właściwości geotechnicznych popiołów lotnych z elektrowni Skawina. Próbkę popiołów pobrano z trzech lejów zsypanych przy elektrofiltrach, oznaczonych jako strefy odpylania I, II i III. Badania obejmowały oznaczenie parametrów charakteryzujących uziarnienie, zagęszczalność, kapilarność, straty prażenia, wodoprzepuszczalność i wytrzymałość na ścinanie. Analizę wyników badań przeprowadzono w aspekcie zastosowania popiołów w budownictwie drogowym. Stwierdzono, że badane popioły z różnych stref odpylania wykazują pewne zróżnicowanie parametrów fizycznych i mechanicznych. Popioły te nie spełniają wymogów dotyczących materiałów stosowanych w budownictwie drogowym. Wskazano, że poprawę właściwości geotechnicznych popiołów lotnych można uzyskać, stosując ich mieszanki z innymi odpadami przemysłowymi o grubszym uziarnieniu lub przez stabilizację środkami wiążącymi. Małe wartości współczynnika filtracji pozwalają zakwalifikować badane popioły jako przydatne do uszczelnień na przykład wałów przeciwpowodziowych lub składowisk odpadów.

Słowa kluczowe: odpady przemysłowe, popioły lotne, właściwości geotechniczne

WSTĘP

W dobie troski o ochronę środowiska sprawne zarządzanie odpadami stało się priorytetem zarówno w skali gospodarki każdego państwa, determinowanej w różnym stopniu przez wszelkiego rodzaju umowy międzynarodowe, jak i w skali mikro, gdzie odpady nierzadko stają się obciążeniem dla poszczególnych firm i gospodarstw. Wzrastająca świadomość problemu pozwala na coraz wydajniejszy obrót odpadami, jak również możliwość czerpania z nich korzyści.

Pomimo wzrostu popularności instalacji spalających gaz oraz alternatywnych źródeł pozyskiwania energii produkcja energii elektrycznej w Polsce oparta jest w ponad 90%

Adres do korespondencji – Corresponding author: Eugeniusz Zawisza, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: kiwig@ur.krakow.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego w klasycznych paleniskach. W wyniku spalania węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach powstają popioły lotne i żużle paleniskowe, czyli tzw. UPS (uboczne produkty spalania), które stanowią ponad 15% ogólnej ilości nagromadzonych w Polsce odpadów przemysłowych uciążliwych dla środowiska [Zabielska-Adamska 2006]. Przykładowo elektrownia Bełchatów produkuje rocznie około 3 mln ton popiołu i żużla. Biorąc pod uwagę tak wielką ilość UPS, wysokie koszty ich składowania oraz niewątpliwe korzyści ekonomiczne, należy stwierdzić, że wykorzystanie tych produktów jest coraz bardziej istotne, tym bardziej że niejednokrotnie w wielu dziedzinach gospodarki odpady te mogą być pełnowartościowym substytutem materiału naturalnego.

Podstawowe zasady gospodarki odpadami, zgodnie z Europejskim Stowarzyszeniem na rzecz Zagospodarowania Odpadami UPS (ECOBA) oraz strategią przyjętą przez kraje członkowskie UE, to ograniczenie ilości powstających odpadów oraz promowanie ich gospodarczego wykorzystania w sposób przyjazny dla środowiska. Wymogi stawiane przez UE w zakresie ochrony przyrody powodują szybkie tempo zmian w technologii zagospodarowania popiołów, tworzenie nowych programów badawczych i edukacyjnych w zakresie zagospodarowania UPS. Zmiany te umożliwiają spojrzenie na popioły z energetyki w innym wymiarze, jako na surowiec wtórny, nie odpad, zgodnie z uchwaloną przez Parlament Europejski dyrektywą odpadową [Dyrektywa... 2008], która stwarza możliwość wytwarzania UPS posiadających status materiału oraz możliwość rejestracji UPS jako substancji chemicznych (REACH) [Svoboda i in. 2007].

Pierwsze próby wykorzystania odpadów powęglowych zostały podjęte w drugiej połowie XVIII wieku i miały charakter rozwiązań raczej doraźnych [Skarżyńska 1997]. Aktualnie przykłady zastosowań popiołów lotnych można znaleźć niemal w każdej gałęzi gospodarki (budownictwo, drogownictwo, górnictwo, a także rolnictwo, zwłaszcza w zakresie odkwaszania gleb). Z upływem czasu nastąpił znaczny postęp we wdrażaniu nowych technologii z wykorzystaniem popiołu (np. cementy i spoiwa hydrauliczne z dużą ilością popiołów czy uszlachetnianie popiołu). Wszystkie te działania prowadzone są z jednoczesnym zachowaniem zasad ochrony przyrody (sprawdzanie wpływu projektowanych produktów na środowisko i zdrowie ludzi). Dla określenia przydatności technologicznej oznacza się podstawowe właściwości chemiczne, fizyczne i mechaniczne, które musi spełniać materiał [Łukasik 1998, Pachowski 2002].

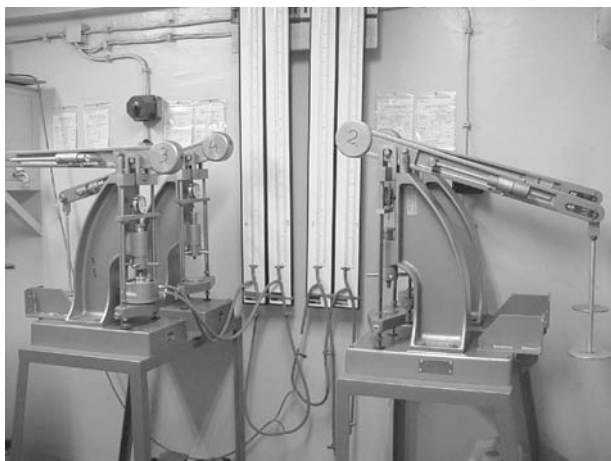
Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy było określenie właściwości geotechnicznych popiołów lotnych z elektrowni Skawina oraz przeprowadzenie analizy w aspekcie możliwości ich zastosowania w budownictwie ziemnym.

METODY BADAŃ

Badania wykonano w dwóch etapach. W pierwszym etapie oznaczono podstawowe właściwości fizyczne: skład granulometryczny, gęstość właściwą szkieletu, wilgotność i straty prażenia. Etap drugi obejmował oznaczenie parametrów, na podstawie których określa się przydatność materiału do celów budownictwa ziemnego, to jest maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej, kapilarności biernej, wskaźnika piaskowego, współczynnika filtracji i wytrzymałości na ścinanie poszczególnych rodzajów popiołu.

Badania przeprowadzono na próbkach popiołów pobranych z trzech kolejnych lejów zsypanych przy elektrofiltrach (oznaczonych w dalszej części pracy jako strefy odpylania I, II i III) oraz mieszanki tych popiołów (oznaczonej jako popiół „średni”).

Parametry fizyczne badanych popiołów oznaczono metodami standardowymi, stosowanymi w geotechnice jak dla gruntów mineralnych. Skład granulometryczny popiołów wykonano metodą łączoną, to jest sitową na „mokro” i areometryczną dla cząstek mniejszych niż 0,063 mm. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność oznaczono metodą suszarkową w temperaturze 105°C. Straty masy przy prażeniu oznaczono w piecu muflowym w temperaturze 600–800°C. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora w cylindrze o objętości 1,0 dm³, stosując standardową energię zagęszczenia $E_z = 0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. Kapilarność bierną i wskaźnik piaskowy oznaczono przy użyciu standardowego zestawu laboratoryjnego. Współczynnik filtracji oznaczono w edometrach (rys. 1) na próbkach ($h = 1,9 \text{ cm}$, $d = 7,5 \text{ cm}$) o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,96$, przy obciążeniu pionowym 12,5 kPa i zmiennym spadku hydraulicznym.



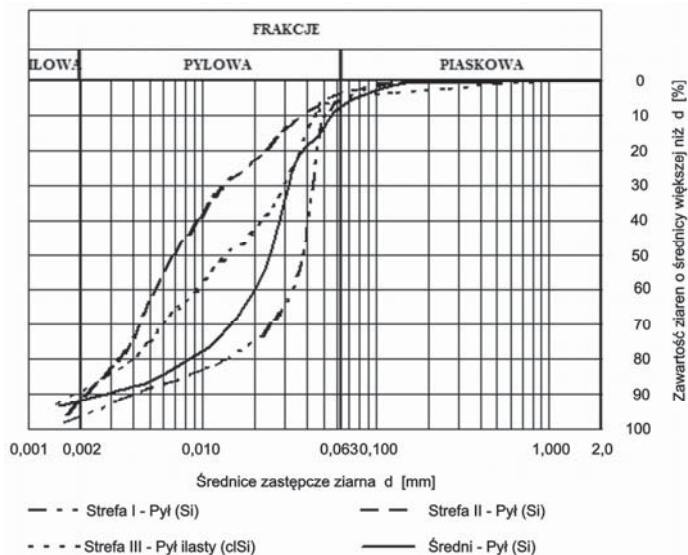
Rys. 1. Edometry z oprzyrządowaniem do oznaczania współczynnika filtracji (fot. F. Skalicz)
Fig. 1. Oedometers with equipment for determination of the filtration coefficient (photo F. Skalicz)

Parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie, to jest kąt tarcia wewnętrzny i spójność, oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o przekroju $60 \times 60 \text{ mm}$ na próbkach o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,96$. Próbkę poddawano konsolidacji trwającej 30 min przy naprężeniach normalnych 50, 100, 150, 200 i 250 kPa, a następnie ścinano przy prędkości $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Badania wykonano w powtórzeniach (po 2 próbki w przypadku składu granulometrycznego, gęstości właściwej szkieletu, wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu, współczynnika filtracji, po 4 w przypadku wilgotności i strat prażenia, po 10 w przypadku kapilarności biernej), oprócz badań wytrzymałości na ścinanie, które wykonano na 5 próbkach dla każdego materiału, jak podano wyżej. Wartości badanych parametrów podano jako średnia z wartości uzyskanych dla poszczególnych próbek.

WYNIKI BADAŃ

Skład granulometryczny popiołów z trzech kolejnych stref odpylania wykazał zróżnicowanie dotyczące zawartości frakcji drobnych. Zawartość frakcji pyłowej zmniejszała się od około 91% w popiele ze strefy I do 84% w strefie III, natomiast zawartość frakcji ilowej zwiększała się odpowiednio od 3,1 do 10,1% (rys. 2, tab. 1). Pod względem geotechnicznym popioły ze strefy I i II oraz uśredniony odpowiadają pyłom, natomiast popiół ze strefy III, zawierający największą zawartość cząstek odpowiadających frakcji ilowej, odpowiada pyłom ilastym. Biorąc pod uwagę wartość wskaźnika różnoziarnistości, można stwierdzić, że popioły ze strefy I, III i popiół średni są materiałami kilkufrakcyjnymi (odpowiednio $C_u = 10,5$ i $11,89$ i $10,37$), a popiół ze strefy II jest materiałem jednofrakcyjnym ($C_u = 4,32$).



Rys. 2. Krzywe uziarnienia badanych materiałów

Fig. 2. Grain size distribution curves of the tested materials

Analizując przydatność badanych popiołów w budownictwie drogowym w odniesieniu do wymogów normy PN-S-02205:1998, można stwierdzić, że pod względem składu granulometrycznego żaden z badanych popiołów nie spełnia wymagań wyżej wymienionej normy, według której zawartość frakcji piaskowo-żwirowej nie powinna być mniejsza niż 35%, a zawartość ziaren 0,075 mm nie powinna być większa niż 75%.

Parametry charakteryzujące podstawowe właściwości fizyczne popiołów z poszczególnych stref wykazują pewne zróżnicowanie (tab. 1), i tak:

1. Gęstość właściwa szkieletu zwiększała się od 2,29 (strefa I) do 2,33 (strefa II) i 2,48 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (strefa III). Wskazuje to na zależność tego parametru od uziarnienia (zwiększająca się zawartość frakcji ilowej w popiołach z kolejnych stref). Gęstość właściwa szkieletu popiołu średniego mieści się w zakresie podanych wyżej wartości tego parametru. Wartości te są stosunkowo nieduże, co świadczy o tym, że popio-

ły lotne są materiałami lekkimi, znacznie lżejszymi niż grunty naturalne – mineralne, o zbliżonym uziarnieniu, których gęstość właściwa szkieletu wynosi $2,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [PN-81/B-03020]. Porównując wyniki badań własnych z wynikami wcześniejszych badań popiołu lotnego z elektrowni Skawina, można stwierdzić, że otrzymane wartości gęstości właściwej szkieletu są zbliżone do wartości podanych przez Furtak [2009], które wynosiły od 2,26 do $2,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Tabela 1. Parametry geotechniczne badanych popiołów
Table 1. Geotechnical parameters of the tested ashes

Parametr – Parameter	Popiół ze strefy – Ash from the zone:				
	I	II	III	średni medium	
Zawartość frakcji – Fraction content:					
piaskowa – sand 0,063–2 [mm]	5,83	3,62	5,51	7,29	
pyłowa – silt 0,002–0,063 [mm]	91,06	88,69	84,35	84,72	
iłowa – clay < 0,002 [mm]	3,11	7,69	10,14	7,99	
Zawartość ziaren – Grain content [%]					
< 0,075 mm	97,0	98,0	96,0	95,0	
< 0,05 mm	89,0	94,0	92,5	87,5	
Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient [–]	10,5	4,32	11,89	10,37	
Nazwa wg Name acc. to PN-EN ISO 14688-2:2006	Si	Si	clSi	Si	
Wilgotność naturalna Natural moisture content [%]	0,25	0,64	1,26	0,75	
Straty masy przy prażeniu Loss on ignition [%]	4,73	4,02	5,77	3,00	
Gęstość właściwa szkieletu Density of solid particles [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,29	2,33	2,48	2,34	
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density of solid particles [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,21	1,23	1,28	1,23	
Wilgotność optymalna Optimum moisture content [%]	31,55	31,55	32,00	30,30	
Kapilarność bierna – Passive capillarity [cm]	55,0	45,40	43,40	70,80	
Współczynnik filtracji przy wskaźniku zagęszczenia 0,96 Permeability coefficient at the degree of compaction 0.96 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]		$2,15\cdot 10^{-8}$	$1,62\cdot 10^{-8}$	$1,74\cdot 10^{-8}$	$2,36\cdot 10^{-8}$
Kąt tarcia wewnętrznego przy wskaźniku zagęszczenia Angle of internal friction at the degree of compaction [°]	0,96 0,90 ^a 1,00 ^a	40,1	37,6	36,1	38,20 28,50 33,60
Spójność przy wskaźniku zagęszczenia Cohesion at the degree of compaction [kPa]	0,96 0,90 ^a 1,00 ^a	55,9	70,8	65,4	55,60 42,50 38,20

^a Gruchot i Sieczka [2013].

2. Kapilarność bierna była stosunkowo nieduża (43–71 cm) i mniejsza od wartości dopuszczalnej (≤ 2 m) według normy PN-S-02205:1998, a więc nie wskazuje na wysadzinowość tych materiałów. Wartości kapilarności biernej popiołów lotnych z siedmiu elektrowni (Blachownia Śląska, Jaworzno II, Łagisza, Stalowa Wola, Elbląg, Warszawa-Żerań i Siekierki) mieściły się w szerokim zakresie od 40 do 140 cm dla popiołów z hałd przyelektrownianych i powyżej 200 cm dla popiołów z silosów (bardzo drobne popioły) z elektrowni Warszawa, Siekierki i Zabrze [Woźnica 1973]. Wartość kapilarności biernej popiołów z mokrego osadnika elektrociepłowni Ostrołęka wynosiła 133 cm dla popiołu grubszego ze strefy zrzutu (typ A) i 150 cm dla popiołu drobniejszego ze strefy studni przelewowej (typ B) [Szymański 1973]. Przytoczone dane świadczą, że uzyskane z badań własnych wartości kapilarności biernej mieszczą się w zakresie wartości tego parametru dla popiołów pochodzących z różnych elektrowni lub elektrociepłowni opalanych węglem kamiennym.

3. Straty masy przy prażeniu badanych popiołów (3–5,8%) były mniejsze od wartości dopuszczalnej ($\leq 10\%$), a więc spełniają wymagania normy PN-S-02205:1998.

4. Wskaźnik piaskowy – wartości tego parametru nie uzyskano, ponieważ w końcowej fazie badania, to jest po wprowadzeniu tłoczka do cylindra, opadł on od razu na dno, a więc wynik był negatywny.

Parametry charakteryzujące zagęszczalność popiołów, to jest wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, były mało zróżnicowane (tab. 1). Wilgotność optymalna wynosiła około 32% (strefy I–III) i ponad 30% (popiół średni). Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu zwiększała się od 1,21 (strefa I) do 1,28 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (strefa III); dla popiołu średniego wynosiła ona 1,23 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Podane wartości nie odbiegają od wartości tych parametrów podawanych dla popiołów lotnych [Grabowski i Obrycki 1973, Lotko 2009].

Odnosząc otrzymane wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu badanych popiołów do wymogów normy PN-S-0205:1998, można stwierdzić, że wszystkie one spełniają warunek, zgodnie z którym wartość omawianego parametru powinna być większa niż 1,0 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Ze względu jednak na bardzo małą wilgotność wszystkich badanych popiołów w celu ich wykorzystania w budownictwie ziemnym należy doprowadzić je do wilgotności optymalnej, przy której można osiągnąć duże zagęszczenie ($I_s \geq 0,95$).

Wartości współczynnika filtracji wszystkich badanych popiołów były tego samego rzędu wielkości i stosunkowo małe – $(1,6\text{--}2,4)\cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (tab. 1). Zgodnie z klasyfikacją Pazdry i Kozerskiego [1990] można je scharakteryzować jako słabo przepuszczalne i odpowiadające gruntom/skałom półprzepuszczalnym. Wyniki badań własnych współczynnika filtracji zbliżone są do wyników badań tego parametru dla popiołu drobnoziarnistego i gruboziarnistego pochodzącego z elektrowni Skawina, wykonanych przez Furtak [2009]. Współczynnik filtracji popiołu gruboziarnistego przy wskaźniku zagęszczenia równym 0,95 wynosił $7,54\cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast współczynnik filtracji popiołu drobnoziarnistego przy tym samym wskaźniku zagęszczenia wynosił $1,77\cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Porównując podane wyżej wartości współczynnika filtracji popiołu lotnego z elektrowni Skawina z wartościami podanymi w literaturze dla popiołów z innych elektrowni lub elektrociepłowni, można stwierdzić ich znaczne zróżnicowanie. Współczynnik filtracji popiołów z elektrowni Rybnik przy małym zagęszczeniu ($I_s = 0,85$) wynosił

$9,8 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast przy większym zagęszczeniu ($I_s = 0,95$) wynosił $3,3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [Zawisza 2001]. Badania Mioduszewskiego [1973] wykazały bardzo duże różnice wartości współczynnika filtracji popiołów zalegających w różnych strefach osadników mokrych elektrowni Żerań, Skawina, Konin i elektrociepłowni Ostrołęka (do badań pobierano próbki o strukturze nienaruszonej). Współczynnik filtracji popiołu grubego w strefie zrzutu pulpy był od kilku- do kilkudziesięciu razy większy niż popiołu drobnego w strefie studni przelewowej. Wykazano również, że z powodu wyraźnej anizotropii popiołów w mokrych składowiskach współczynnik filtracji w kierunku poziomym (przepływ wody równoległy do uwarstwienia) jest od kilku- do kilkunastu razy większy od współczynnika filtracji w kierunku pionowym (przepływ wody prostopadły do uwarstwienia). Przykładowo współczynnik filtracji popiołów wynosił:

- ze składowiska Żerań: w strefie zrzutu – $k_{\text{poz}} = 4,13\text{--}5,12 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $k_{\text{pion}} = 4,25\text{--}4,51 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, w strefie studni – $k_{\text{poz}} = 0,210\text{--}0,70 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $k_{\text{pion}} = 0,13\text{--}0,27 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- ze składowiska Skawina: w strefie zrzutu – $k_{\text{poz}} = 1,14\text{--}1,42 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $k_{\text{pion}} = 0,50\text{--}0,59 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, w strefie studni – $k_{\text{poz}} = 0,05\text{--}0,11 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $k_{\text{pion}} = 0,01\text{--}0,03 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Badania Szymańskiego [1973] wykonane na popiołach ze składowiska elektrociepłowni Ostrołęka wykazały zależność współczynnika filtracji od uziarnienia i zagęszczenia popiołu. Współczynnik filtracji popiołów wynosił: w strefie zrzutu (typu A) popiół niezagęszczony (luźny) $6,6 \cdot 10^{-6}\text{--}8,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, zagęszczony $4,3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; w strefie studni (typu B) popiół zagęszczony $1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (popiołu luźnego nie badano).

Zabielska-Adamska [2006] wykonała badania wodoprzepuszczalności popiołu lotnego z elektrociepłowni Białystok w aspekcie zastosowania go do formowania warstw uszczelniających. Badania prowadzono w komorze konsolidacji hydraulicznej typu Rowe'a na próbkach zagęszczonych metodą standardową i zmodyfikowaną Proctora w zakresie wilgotności $w_{\text{opt}} = \pm 5\%$. Wartości współczynnika filtracji nasączanych próbek popiołu zagęszczonych metodą standardową zawierały się w dużo szerszym zakresie (od $1,4 \cdot 10^{-7}$ do $3,7 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) niż próbek zagęszczonych metodą zmodyfikowaną (od $7,3 \cdot 10^{-8}$ do $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Wytrzymałość na ścinanie była stosunkowo duża (tab. 1). Wartości kąta tarcia wewnętrznego zmniejszały się od 40° (strefa I) do 36° (strefa III), co wskazuje na zależność tego parametru od zawartości frakcji iłowej. Wartości spójności wykazały wyraźne różnicowanie (56 kPa dla popiołów ze strefy I i średniego, 71 kPa dla popiołu ze strefy II i 65 kPa dla popiołu ze strefy III). Wartości te nie wskazują na zależność tego parametru od strefy poboru popiołu. Przedstawiane wartości parametrów wytrzymałościowych przy $I_s = 0,96$ były wyraźnie większe od wartości podanych dla popiołów z elektrowni Skawina przez Gruchota i Sieczkę [2013] przy $I_s = 0,90$ i 1,00. Według cytowanych autorów kąt tarcia wewnętrznego wykazywał zależność od zagęszczenia i zwiększał się od około 29 do 34° odpowiednio do zwiększania wskaźnika zagęszczenia – od $I_s = 0,90$ do 1,00. Spójność nie wykazywała zależności od zagęszczenia, a jej wartości wynosiły od około 43 kPa przy $I_s = 0,90$ do 38 kPa przy $I_s = 1,00$.

PODSUMOWANIE

Analizując otrzymane wyniki badań w aspekcie przydatności popiołów lotnych w budownictwie ziemnym, zwłaszcza drogowym, można stwierdzić, że nie spełniają one wymogów odnośnej normy w zakresie parametrów charakteryzujących uziarnienie. Spełniają natomiast wymogi w zakresie strat prażenia, kapilarności biernej, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i kąta tarcia wewnętrznego. Wcześniejsze badania prowadzone w Katedrze Inżynierii Wodnej i Geotechniki UR w Krakowie [Zawisza i in. 2006, Zawisza i Kłęk 2006, Zawisza i Sobuła 2007, Zawisza i Franczak 2010] wykazały, że poprawę właściwości geotechnicznych popiołów lotnych można uzyskać, stosując:

- mieszanki popiołów lotnych z innymi odpadami przemysłowymi o grubszym uziarnieniu, takimi jak odpady powęglowe (skała płonna) lub pohutnicze (żużle wielkopieczowe),
- stabilizację popiołów lotnych środkami wiążącymi: silmentem, cementem lub wapnem hydratyzowanym.

W efekcie powyższych zabiegów uzyskuje się materiały o korzystnym uziarnieniu, dobrej zagęszczalności, dużej wytrzymałości na ścinanie i małej ściśliwości. Mogą one być stosowane jako antropogeniczne grunty budowlane w budownictwie ziemnym, zarówno komunikacyjnym, jak i hydrotechnicznym.

Małe wartości współczynnika filtracji pozwalają zakwalifikować badane popioły jako przydatne do uszczelnień. Można zatem, po doprowadzeniu ich do wilgotności optymalnej, zastosować je do formowania przesłon uszczelniających w wałach przeciwpowodziowych. Można również wykorzystać je do budowy mineralnych warstw uszczelniających pod nasypami oraz jako uszczelnienia składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych, zwłaszcza przy zastosowaniu dodatków ulepszających, takich jak spoiwa hydrauliczne lub bentonit.

PIŚMIENNICTWO

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylające niektóre dyrektywy. Dz.U. UE L z dnia 22 listopada 2008 r.
- Furtak, A. (2009). Wpływ zagęszczenia na wodoprzepuszczalność odpadów poenergetycznych. Praca magisterska. Maszynopis. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnistego, Kraków.
- Grabowski, Z., Obrycki, M. (1973). Niektóre geotechniczne właściwości materiałów z hałd hydraulicznego opielania elektrowni. Sympozjum „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych”. Wyd. Geolog., Częstochowa, 37–45.
- Gruchot, A., Sieczka, P. (2013). Wpływ zbrojenia rozproszonego na właściwości geotechniczne popiołu lotnego. *Drogownictwo*, 7–8, 241–246.
- Lotko, M. (2009). Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na ściśliwość odpadów poenergetycznych. Praca magisterska. Maszynopis. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnistego, Kraków.
- Łukasik, S. (1998). Geotechniczne właściwości popiołów tworzących składowiska mokre elektrowni Bełchatów. Praca doktorska. Maszynopis. ITB, Warszawa.

- Mioduszewski, W. (1973). Charakterystyka inżynierskich właściwości odpadów paleniskowych składowanych hydraulicznie w zbiorniku osadowym. Symposium „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych”. Wyd. Geolog., Częstochowa, 25–36.
- Pachowski, J. (2002). Rozwój technologii powstawania ubocznych produktów elektrownianych oraz ich charakterystyka i możliwości zastosowań w technologiach budownictwa drogowego. *Drogi i Mosty*, 1, 55–99.
- Pazdro, Z. Kozerski, B. (1990). Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- Skarżyńska, K. (1997). Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Wyd. AR w Krakowie, Kraków.
- Svoboda, M., Ledererova, J., Suchardova, M., Leber, P. (2007). Wykorzystanie produktów spalania węgla w przemyśle budowlanym i pokrewnych branżach w związku z europejską regulacją REACH. Materiały XIV Międzynarodowej Konferencji „Popioły z energetyki”. Wyd. Ekotech Sp. z o.o., Szczecin, 151–162.
- Szymański, M. (1973). Struktura a właściwości fizyko-mechaniczne popiołów węglowych elektrowni Ostrołęka. Symposium „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych”. Wyd. Geolog., Częstochowa, 59–71.
- Woźnica, J. (1973). Popioły lotne z hałd przyelektrownianych jako materiał do budowli komunikacyjnych. Symposium „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych”. Wyd. Geolog., Częstochowa, 383–392.
- Zabielska-Adamska, K. (2006). Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających. Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok.
- Zawisza, E. (2001). Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. Zeszyty Naukowe UR, Kraków.
- Zawisza, E. Franczak, A. (2010). Wytrzymałość i mrozoodporność stabilizowanych popiołów lotnych. *Drogownictwo*, 6, 202–207.
- Zawisza, E., Kłęk, K. (2006). Stabilizacja popiołów spoiwami „Silment” w drogownictwie. *Drogownictwo*, 12, 396–401.
- Zawisza, E., Sobuła, K. (2007). Wytrzymałość i mrozoodporność popiołów lotnych z elektrocieplowni „Kraków” stabilizowanych cementem lub wapnem. XXX ZSMGiG „Geotechnika w budownictwie i górnictwie”, Szklarska Poręba. Prace Nauk. Inst. Geotechniki i Hydrotechniki Pol. Wrocław, 76, Konferencje 42, 665–676.
- Zawisza, E., Gruchot, A., Michalski, P. (2006). Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrocieplowni „Łęg” w Krakowie. *Inż. Morska i Geotechnika*, 27, 1, 22–30.

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF FLY ASHES DEPENDING ON THE DEDUSTING ZONE

Abstract. The article contains results of tests of geotechnical properties of fly ashes from the Skawina Power Plant. Samples of the ashes were taken from three discharge hoppers with electrostatic precipitators, marked as dedusting zones I, II and III. The research included determination of parameters characterising the particle size distribution, compactibility, capillarity, loss on ignition, water permeability and shear strength. The analysis of the results of the tests was carried out in the context of the use of the ashes in road building.

It was found that the tested ashes from different dedusting zones have relatively small differences in physical characteristics and mechanical properties. The ashes do not meet the requirements for materials used in road building. It was pointed out that the improvement of the geotechnical properties of the fly ashes could be obtained by using mixtures thereof with other industrial wastes of coarser graining or by stabilisation with binding agents. Low values of permeability coefficient result in the classification of the tested ashes as suitable for sealing for example levees or landfills.

Keywords: industrial wastes, fly ashes, geotechnical properties

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 12.06.2016

Cytowanie: Zawisza, E., Kuska, N. (2016). Właściwości geotechniczne popiołów lotnych w zależności od strefy odpylania. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (2), 103–112.