

Ocena przydatności wybranych mieszanin popiołowo-żużlowych do budowy nasypów drogowych

Dr hab. inż. Andrzej Gruchot, dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza, prof. UR, dr inż. Tymoteusz Zydrón
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji

Budowa nasypów komunikacyjnych wymaga stosowania kwalifikowanych materiałów ziemnych. Wzrost ilości realizowanych inwestycji drogowych powoduje zwiększenie zapotrzebowania na materiały ziemne. Poza tym, trasy drogowe, ze względu na koszty, coraz częściej prowadzi się po nasypach ziemnych, a nie po konstrukcjach żelbetowych [1]. Powoduje to powstawanie problemów z pozyskaniem odpowiednich naturalnych gruntów mineralnych. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie do budowy nasypów drogowych odpadów przemysłowych. Odpady te po wstępnym przetworzeniu mogą stanowić wysokowartościowe materiały antropogeniczne (tzw. kruszywa z recyklingu lub sztuczne) o odpowiednim zakresie uziarnienia [3, 14, 19]. Materiały antropogeniczne o drobnym uziarnieniu, takie jak popioły lotne zaliczane do tzw. ubocznych produktów spalania (UPS), mogą być również stosowane jako składnik mieszanek lub stabilizator gruntów słabonośnych mineralnych lub organicznych. Stabilizacja gruntów z wykorzystaniem popiołów lotnych pozwala na szersze zagospodarowanie tego rodzaju materiałów, ale poprawia także właściwości gruntów nienośnych. Popioły lotne oraz żużle mogą być stosowane również do produkcji kruszywa lekkich [2, 5].

Przedmiotem badań w niniejszej pracy były mieszaniny popiołowo-żużłowe powstające ze spalania węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Materiały te stanowią największą masę odpadów energetycznych deponowanych na składowiskach. W 2016 roku wyprodukowano około 11,4 mln ton tych mieszanin, co stanowi 8,9% ogólnej liczby odpadów przemysłowych [12]. Zakres oraz sposób wykorzystania mieszanin zależy od ich właściwości chemicznych i geotechnicznych, które z kolei zależą między innymi od rodzaju spalanego węgla, technologii spalania oraz rodzaju transportu i składowania [2, 13, 18, 21]. Mieszaniny popiołowo-żużłowe wykorzystuje się najczęściej do wypełnień budowlanych, zasypywania wykopów, budowy nasypów drogowych, rekultywacji terenów zdegradowanych i składowisk odpadów komunalnych [7, 15, 20, 22]. W Polsce klasyfikacja przydatności mieszanin popiołowo-żużlowych do celów budownictwa ziemnego oparta jest głównie na normie [17], zgodnie z którą są one zaliczane do materiałów przydatnych z zastrzeżeniami. Zastrzeżenia te wskazują, że mogą one być wbudowywane w miejsca suche lub odizolowane od wody w nasypie ziemnym. Podawane zalecenia potwierdzają również prowadzone badania nad ich zastosowaniem do celów budownictwa ziemnego [2, 15, 23].

Celem prezentowanych w pracy badań było określenie podstawowych parametrów geotechnicznych oraz wpływu obciążenia i nasączenia wodą na wskaźnik nośności mieszanin popiołowo-żużlowych pochodzących z Elektrowni „Skawina” i Elektrociepłowni „Kraków”. Wyniki badań stanowiły podstawę do oceny przydatności badanych mieszanin do budowy nasypów drogowych.

ZAKRES I METODY BADAŃ

Mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrowni „Skawina” pochodziła z osadnika zlokalizowanego w Borku Szlacheckim

koło Skawiny, w którym była składowana na mokro, i była pobierana próba 1 w 2010 roku [8] oraz próba 2 w 2012 roku [9]. Natomiast mieszanina z Elektrociepłowni „Kraków” pochodziła ze składowiska powierzchniowego zlokalizowanego w Pleszowie w Krakowie, na którym była składowana na sucho i była pobrana próba w 2015 roku [11].

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności mieszanin oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia oznaczono metodą sitową z przemywaniem wodą dla ziaren i cząstek większych od 0,063 mm oraz metodą 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 przy energii zagęszczania 0,59 J·cm⁻³.

Badania wskaźnika nośności wykonano na próbkach o uziarnieniu mniejszym od 20 mm. Wilgotność wyjściową wyznaczono zgodnie z normą [17] z krzywej zagęszczalności każdego materiału i odpowiadała ona 99% wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu (rys. 1).

Wskaźnik nośności określono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po czterech dobach nasączenia wodą [17], bez obciążenia oraz przy obciążeniu siłą 22 i 44 N i penetracji trzpienia o powierzchni 20 cm² do głębokości 2,5 i 5,0 mm z prędkością 1,25 mm·min⁻¹. Jako wartość miarodajną przyjęto wyższą wartość wskaźnika nośności. W trakcie procesu nasączenia rejestrowano zmiany wysokości próbki spowodowane nasyceniem jej wodą. Pęcznienie liniowe określono jako stosunek przyrostu wysokości do początkowej wysokości próbki i wyrażono w procentach. Badania wykonano w co najmniej dwóch powtórzeniach. Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono na podstawie wartości średnich wskaźnika nośności i wilgotności w strefie penetracji trzpienia.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

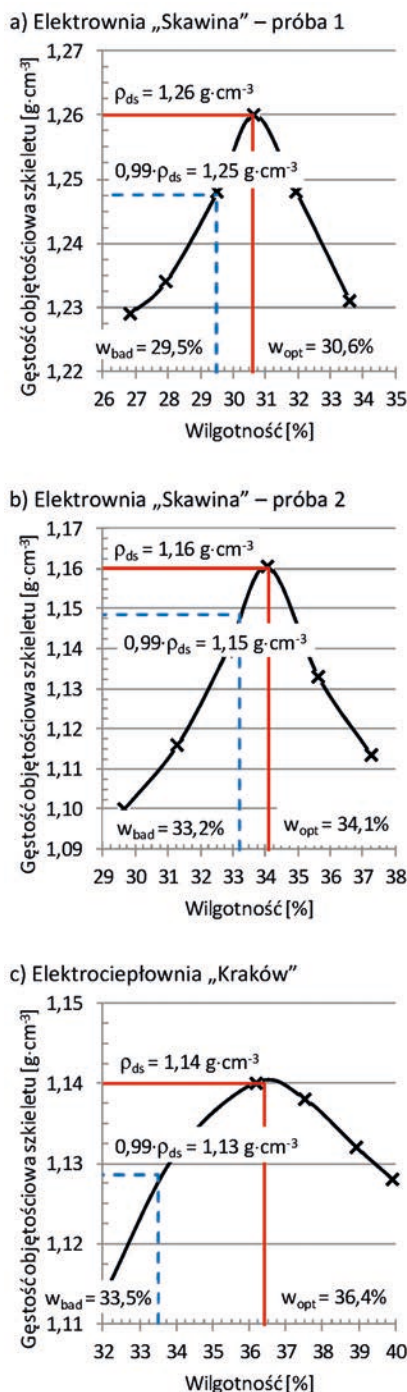
Właściwości fizyczne

Pod względem geotechnicznym [16] mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrowni „Skawina” odpowiadała kilkufrakcyjnym piaskom drobnym pylastym. Mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrociepłowni „Kraków” pod względem uziarnienia odpowiadała wielofrakcyjnym piaskom pylastym ze żwirem (grsiSa) [16]. Właściwości geotechniczne obydwu mieszanin zestawiono w tabl. 1, a ich krzywe uziarnienia pokazano na rys. 2.

Wykazane znaczne różnice w wartościach kapilarności biernej i wskaźnika piaskowego przy zbliżonym składzie uziarnienia obydwu mieszanin popiołowo-żużlowych mogą wynikać z różnej metody ich składowania (na sucho i na mokro) oraz z różnej lokalizacji poboru na terenie składowiska. Na wpływ tych czynników na wartości kapilarności biernej zwracają uwagę między innymi Kucowski i in. [13].

Wskaźnik nośności

Próba 1 mieszaniny popiołowo-żużłowej z Elektrowni „Skawina” [8] charakteryzowała się dużymi wartościami wskaźnika

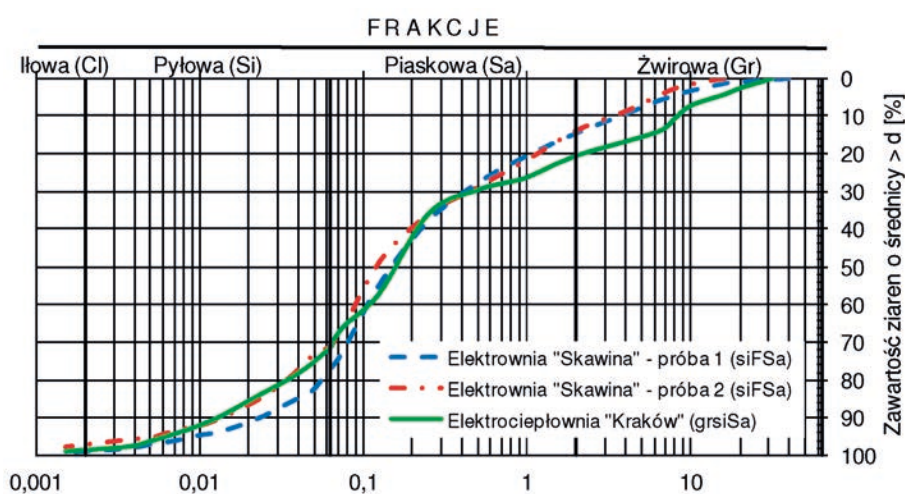


Rys. 1. Krzywe zagęszczalności badanych materiałów (w_{bad} oznaczono zgodnie z [17])

Tabl. 1. Charakterystyka geotechniczna badanych mieszanin popiołowo-żużlowych

Parametr	Pochodzenie mieszaniny popiołowo-żużlowej		
	Elektrownia „Skawina” – próba 1 ¹⁾	Elektrownia „Skawina” – próba 2 ²⁾	Elektrociepłownia „Kraków” ^{3,3)}
Nazwa według [16]	siFSa (piasek drobny pyłasty)		grsiSa (piasek pyłasty ze żwirem)
Wskaźnik różnoziarnistości C_u [–]	9,6	7,8	7,9
Wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c [–]	1,3	2,8	2,4
Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	30,6	34,1	36,4
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} [g·cm ⁻³]	1,26	1,16	1,14
Gęstość właściwa szkieletu ρ_s [g·cm ⁻³]	2,48	2,41	2,42
Kapilarność bierna H_{kb} [m]	0,44	–	0,84 ⁴⁾
Wskaźnik piaskowy WP [–]	48,6	–	18,9 ⁴⁾

¹⁾za [8], ²⁾za [9], ³⁾za [11], ⁴⁾za [4]



Rys. 2. Wykres uziarnienia badanych mieszanin popiołowo-żużlowych

nośności, które zależały od zmian wilgotności spowodowanych nasączeniem próbek (rys. 3a) oraz od ich obciążenia (rys. 4a):

- dla próbek bez obciążenia – bezpośrednio po zagęszczeniu wskaźnik nośności wynosił około 32%, natomiast po czterodobowym czasie nasączenia przy wzroście wilgotności o ponad 8% nastąpiło zmniejszenie wskaźnika nośności do 26%,
- dla próbek obciążonych siłą 22 N – bezpośrednio po zagęszczeniu wskaźnik nośności wynosił 38%, zwiększenie wilgotności po czterech dobach nasączenia wyniosło 8%, a wskaźnik nośności zmniejszył się do około 32%,
- dla próbek obciążonych siłą 44 N – wskaźnik nośności bezpośrednio po zagęszczeniu wynosił około 44%, a po czterech dobach nasączenia zmniejszył się do nieco ponad 37% przy wzroście wilgotności o niecałe 7%.

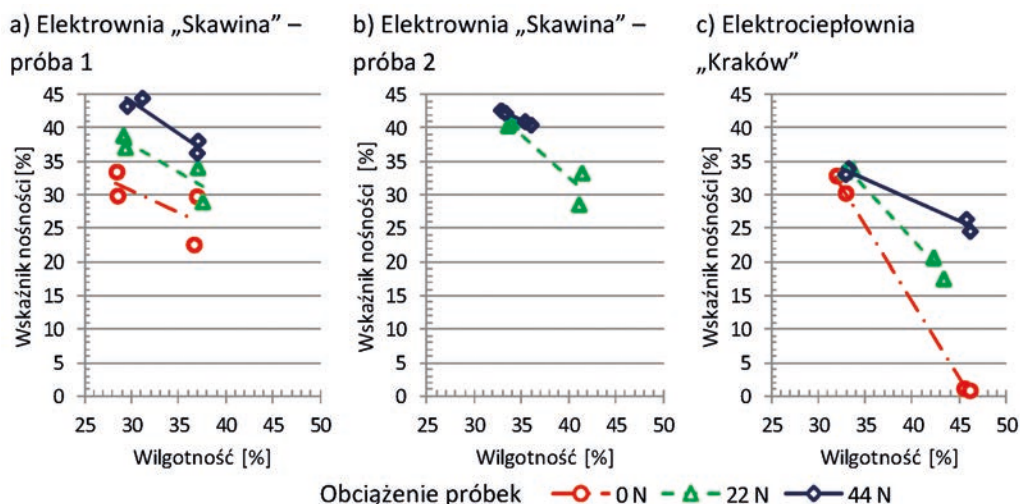
Analizując wpływ wilgotności można stwierdzić, że jej wzrost o około 7 ÷ 8% spowodował zmniejszenie wskaźnika nośności o około 3 ÷ 10% w stosunku do próbek bezpośrednio po zagęszczeniu. Natomiast wzrost obciążenia od 0 do 44 N dla próbek bezpośrednio po zagęszczeniu spowodował zwiększenie wskaźnika nośności z 32 na 44% (rys. 4a). W przypadku wskaź-

nika nośności po czterodobowym czasie nasączenia obserwowano jego zwiększenie od 26% dla próbek bez obciążenia do 37% dla próbek przy obciążeniu 44 N.

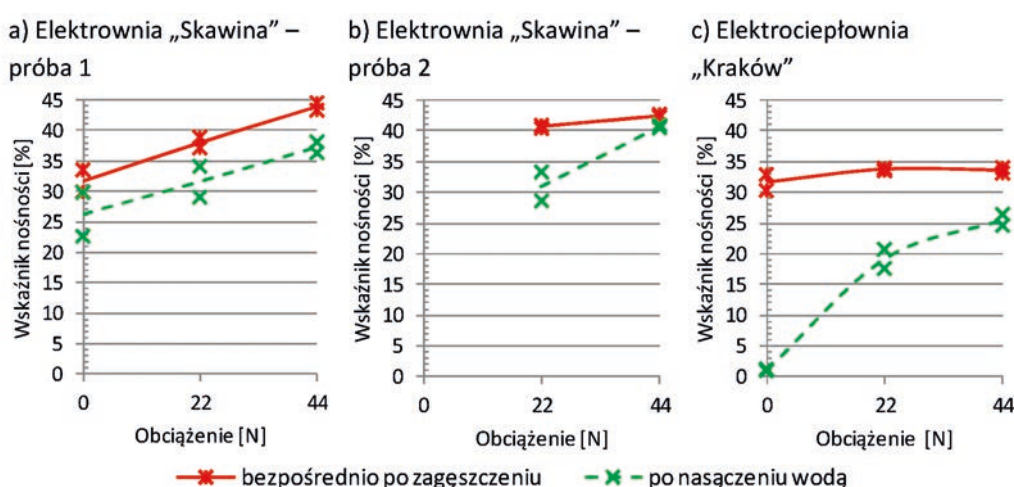
Podobną zależność stwierdzono dla próby 2 mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” [9]. W tym przypadku również wzrost obciążenia próbek z 22 na 44 N spowodował zwiększenie wskaźnika nośności, które w badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu było nieznaczne i wynosiło około 2%. Natomiast dla próbek po czterodobowym nasączeniu wodą wzrost obciążenia z 22 na 44 N spowodował zwiększenie wskaźnika nośności o około 10% (rys. 3b i 4b).

Analizując wpływ zmian wilgotności po czterodobowym nasączeniu wodą próbek mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrociepłowni „Kraków” stwierdzono, że (rys. 3c):

- dla próbek bez obciążenia wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosił około 32%, a po nasączeniu wodą przy wzroście wilgotności o ponad 13% zmniejszył się i wynosił nieco ponad 1%; podane wartości wskazują, że mieszanina popiołowo-żużlowa prawie całkowicie utraciła nośność po nasączeniu wodą,



Rys. 3. Wpływ wilgotności w strefie penetracji trzpienia na wskaźnik nośności badanych mieszanin popiołowo-żużlowych przy różnym obciążeniu



Rys. 4. Wpływ obciążenia na wskaźnik nośności badanych mieszanin popiołowo-żużlowych

- dla próbek przy obciążeniu siłą 22 N wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosił blisko 34%; wzrost wilgotności po czterodobowym nasączeniu wyniósł około 10%, a wskaźnik nośności zmniejszył się i wynosił nieco ponad 19%,
- dla próbek przy obciążeniu siłą 44 N wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosił blisko 34%; wilgotność po nasączeniu w wodzie wzrosła o blisko 13%, a wskaźnik nośności zmniejszył się i wynosił około 26%.

Wzrost obciążenia z 0 na 44 N spowodował zwiększenie wskaźnika nośności dla próbek bezpośrednio po ich zagęszczeniu od 32 do 34%, a po czterech dobach nasączenia wodą od nieco ponad 1 do 26% (rys. 4c). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić bardzo duży wpływ zwiększenia wilgotności po czterech dobach nasączenia wodą na zmniejszenie wskaźnika nośności – mieszanina popiołowo-żużłowa przy braku obciążenia praktycznie utraciła nośność. Zatem, przy właściwym odizolowaniu mieszaniny popiołowo-żużłowej od wody ciężar konstrukcji nawierzchni drogowej powinien zapewnić zachowanie właściwej nośności podłoża wykonanego z mieszaniny popiołowo-żużłowej.

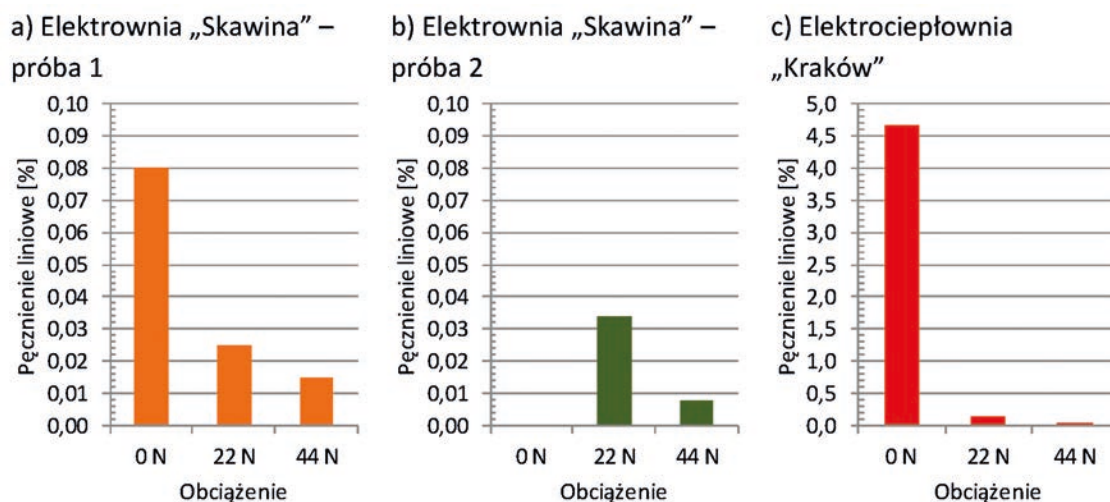
Pęcznienie liniowe

Pęcznienie liniowe mieszaniny popiołowo-żużłowej z Elektrowni „Skawina” było niewielkie i nie przekraczało 0,1% (rys. 5a,b). Natomiast pęcznienie mieszaniny popiołowo-żużłowej z Elektrociepłowni „Kraków” wahało się średnio od około 0,035% (przy obciążeniu 44 N) do około 4,67% (mieszanina bez obciążenia) (rys. 5c), a przy obciążeniu 22 N wynosiło około 0,15%.

Największy przyrost pęcznienia liniowego obserwowano po pierwszej lub drugiej dobie badania, a w kolejnych dobach obserwowano nieznaczny jego przyrost lub stabilizację. Należy zaznaczyć, że wzrost obciążenia z 0 na 44 N w przypadku obydwu mieszanin spowodował znaczne zmniejszenie wartości pęcznienia liniowego.

Dyskusja wyników

Porównując uzyskane wyniki badań wskaźnika nośności obydwu mieszanin popiołowo-żużłowych należy stwierdzić, że mieszanina z Elektrowni „Skawina” cechowała się wyższymi



Rys. 5. Wpływ obciążenia na pęcznienie liniowe badanych mieszanin popiołowo-żużlowych

jego wartościami (rys. 3). Jedynie dla próbek bez obciążenia bezpośrednio po zagęszczeniu uzyskano takie same wartości wskaźnika nośności obydwu mieszanin (rys. 4). Natomiast dla próbek przy obciążeniu 22 i 44 N wskaźnik nośności mieszaniny z Elektrowni „Skawina” był większy o około 6 i 10% (odpowiednio o 17 i 29% względnych) od wartości dla mieszaniny z Elektrociepłowni „Kraków”.

Nasączenie wodą mieszanin przez cztery doby spowodowało zmniejszenie wskaźnika nośności. W przypadku mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” nastąpiło zmniejszenie wskaźnika nośności w zakresie od około 2 do 10% w stosunku do wartości uzyskanych bezpośrednio po zagęszczeniu. W przypadku mieszaniny z Elektrociepłowni „Kraków” przy braku obciążenia nastąpiła prawie całkowita utrata nośności (zmniejszenie o ponad 30%), natomiast przy obciążeniu 22 i 44 N wartości wskaźnika nośności zmniejszyły się odpowiednio o ponad 14 i 8%, przy czym były to wartości mniejsze o ponad 12 i 13% (odpowiednio o 63 i 53% względne) w stosunku do wskaźnika nośności mieszaniny z Elektrowni „Skawina”.

Analizując wartości pęcznienia liniowego należy stwierdzić, że w przypadku mieszaniny z Elektrowni „Skawina” było ono pomijalnie małe i nie przekraczało 0,1%. Natomiast pęcznienie mieszaniny z Elektrociepłowni „Kraków” cechowało się znacznie większymi wartościami, które zmniejszały się od około 4,7% do około 0,04% wraz ze wzrostem obciążenia. W wyniku przeprowadzonych obserwacji stwierdzono, że pęcznieniu ulegała głównie górna warstwa próbek o grubości około 3 ÷ 4 cm. W tej

warstwie obserwowano znaczny wzrost wilgotności, co w rezultacie miało wpływ na zmniejszenie wartości wskaźnika nośności.

OCENA PRZYDATNOŚCI BADANYCH MATERIAŁÓW DO BUDOWY NASYPÓW DROGOWYCH

Analizę przydatności obydwu mieszanin popiołowo-żużlowych do budowy nasypów drogowych przeprowadzono w oparciu o normę [17], uwzględniając ich właściwości wpływające na wysadzinowość, skład granulometryczny, maksymalną gęstość objętościową szkieletu, wskaźnik nośności po czterech dobach nasączenia w wodzie oraz pęcznienie liniowe.

Obydwie mieszaniny popiołowo-żużłowe ze względu na zawartość cząstek poniżej 0,075 mm (powyżej 30%) i cząstek poniżej 0,02 mm (powyżej 10%) zakwalifikowano do gruntów wysadzinowych (tabl. 2). Natomiast ze względu na kapilarność bierną wynoszącą poniżej 1,0 m i wskaźnik piaskowy powyżej 35 można je zaklasyfikować do gruntów niewysadzinowych. Jak zauważa Garlikowski i in. [6] ocena wysadzinowości odpadów poenergetycznych w oparciu o wymienione właściwości może być niedokładna. Ocena ta powinna uwzględniać również podatność mrozową na podstawie badań przyrostu wysokości zamrażanych próbek.

W przypadku mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” zawartość frakcji piaskowo-żwirowej wynosiła ponad 70%, co ponad dwukrotnie przekraczało wymagania

Tabl. 2. Klasyfikacja badanych mieszanin popiołowo-żużlowych pod względem wysadzinowości w oparciu o PN-S-02205:1998

Parametr	Pochodzenie mieszaniny popiołowo-żużlowej			
	Elektrownia „Skawina” (zakres dla obydwu prób)		Elektrociepłownia „Kraków”	
	Uzyskana wartość	Ocena	Uzyskana wartość	Ocena
Zawartość cząstek [%]: ≤ 0,075 mm ≤ 0,02 mm	27,5-33,2 9,0-14,0	wysadzinowe	33,0 14,5	wysadzinowe
Kapilarność bierna [m]	0,44	niewysadzinowe	0,84	niewysadzinowe
Wskaźnik piaskowy [-]	48,6	niewysadzinowe	18,9	niewysadzinowe

Tabl. 3. Wartości parametrów geotechnicznych badanych mieszanin popiołowo-żużlowych na tle wymagań normowych do nasypów drogowych

Parametr	Jednostka	Wymagania normowe ¹⁾	Pochodzenie mieszaniny popiołowo-żużlowej			
			Elektrownia „Skawina” (obydwie próby)		Elektrociepłownia „Kraków”	
			Uzyskana wartość	Ocena	Uzyskana wartość	Ocena
Uziarnienie:						
– zawartość frakcji piaskowo-żwirowej	%	≥ 35	77,5-71,0	+	70,9	+
– zawartość ziaren poniżej 0,075 mm		≤ 75	27,5-33,2	+	33,0	+
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds}	g·cm ⁻³	≥ 1,0	1,16-1,26	+	1,14	+
Wskaźnik nośności po czterech dobach nasączenia wodą:						
a) z obciążeniem 22 N,	%	≥ 10	31,0-31,6	+	19,2	+
b) z obciążeniem 44 N.			37,2-40,8	+	25,5	+
Pęcznienie liniowe materiału:						
a) bez obciążenia,	%	≤ 2	0,08	+	4,67	–
b) z obciążeniem 44 N.		≤ 0,5 ²⁾	0,01-0,02	+	0,04	+
Kąt tarcia wewnętrznego	°	≥ 20	32,3-43,6 ³⁾	+	31,1-35,0 ⁴⁾	+
Kapilarność bierna	m	≤ 2,0	0,44	+	0,84	+

Ocena: (+) – przydatny do celów budownictwa drogowego,

(-) – nie przydatny do celów budownictwa drogowego.

¹⁾zgodne z [17], ²⁾wymagania przy obciążeniu 3 kN·m², ³⁾za [7], ⁴⁾za [10]

normowe (tabl. 3). Natomiast zawartość cząstek mniejszych od 0,075 mm wynosiła średnio 30%, co było ponad dwukrotnie mniej od dopuszczalnych wymagań normowych (tabl. 3). Podobnie mieszanina spełniała wymagania odnośnie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu, która powinna być większa od 1 g·cm⁻³ i wynosiła 1,26 g·cm⁻³. Wskaźnik nośności po czterech dobach nasączenia w wodzie przy obciążeniu siłą 22 N wynosił 32%, a więc był ponad trzykrotnie większy od wymaganego. Natomiast przy obciążeniu 44 N był czterokrotnie większy od wymaganego i wynosił 39%. Pęcznienie liniowe również było znacznie poniżej wartości dopuszczalnej, tak bez, jak i z obciążeniem próbek i nie przekraczało 0,1%. Wartości kąta wewnętrznego uzyskane przy wilgotności optymalnej mieszaniny były nawet dwukrotnie większe od wymaganej (20°). Podsumowując należy stwierdzić, że mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrowni „Skawina” spełnia kryteria przydatności do budowy nasypów drogowych.

W przypadku mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrociepłowni „Kraków” zawartość frakcji piaskowo-żwirowej wynosiła 71%, co również ponad dwukrotnie przekracza wymagania normowe, natomiast zawartość cząstek mniejszych od 0,075 mm wynosiła średnio 33%, co jest ponad dwukrotnie mniej od dopuszczalnych wymagań normowych (tabl. 3). Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszaniny wynosiła 1,14 g·cm⁻³, a więc była większa od wymaganej wartości. Wskaźnik nośności po czterech dobach nasączenia dla próbek przy obciążeniu siłą 22 N wynosił 19%, był zatem około dwukrotnie większy od wymaganego. Również przy obciążeniu 44 N był dwa i pół raza większy od wymaganego i wynosił 26%. Należy zauważyć, że wymagania normy [17] odnośnie wskaźnika nośności dotyczą tylko próbek z obciążeniem, tak więc wymagania te są spełnione z dużym zapasem. Pęcznienie liniowe próbek bez obciążenia było duże i przekraczało ponad dwukrotnie wartość dopuszczalną, a z obciążeniem było małe (0,04%) i nie przekra-

czało wartości dopuszczalnej wynoszącej 0,5%. Wartości kąta wewnętrznego uzyskane przy wilgotności optymalnej, jak i po nawodnieniu były znacznie większe od minimalnej wymaganej jego wartości. Podsumowując należy stwierdzić, że mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrociepłowni „Kraków” ze względu na wartości pęcznienia liniowego próbek bez obciążenia nie spełnia kryteriów przydatności do celów budownictwa drogowego. Ze względu jednak na spełnienie pozostałych kryteriów proponuje się rozważyć możliwość jej wykorzystania z zastosowaniem zabiegów zmniejszających jej pęcznienie liniowe, np. przez zastosowanie stabilizacji spoiwami hydraulicznymi.

WNIOSKI

1. Wskaźnik nośności badanych mieszanin zależał od ich wilgotności i obciążenia, a najwyższe jego wartości uzyskano dla próbek bezpośrednio po zagęszczeniu. Wzrost wilgotności w wyniku czterodobowego nasączenia wodą spowodował nieznaczne zmniejszenie wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” i Elektrociepłowni „Kraków” przy obciążeniu 22 i 44 N oraz prawie całkowitą utratę nośności mieszaniny z Elektrociepłowni „Kraków” dla próbek bez obciążenia.
2. Wzrost obciążenia od 0 do 44 N spowodował nieznaczne zwiększenie wskaźnika nośności próbek obydwu mieszanin bezpośrednio po ich zagęszczeniu. Po czterodobowym nasączeniu wodą wpływ ten był znaczny i można przypuszczać, że ciężar ewentualnej konstrukcji nawierzchni drogowej będzie czynnikiem zwiększającym nośność nasypu wykonanego z mieszanin popiołowo-żużlowych.
3. Analizując przydatność odpadów do budowy nasypów drogowych można stwierdzić, że:

- najbardziej korzystnymi parametrami geotechnicznymi charakteryzowała się mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrowni „Skawina”; korzystne parametry charakteryzujące uziarnienie, zagęszczalność i nośność kwalifikują ten materiał jako przydatny do budowy nasypów drogowych,
- mniej korzystnymi parametrami geotechnicznymi charakteryzuje się mieszanina popiołowo-żużłowa z Elektrociepłowni „Kraków”; jej pęcznienie liniowe i znaczne pogorszenie nośności po nasączeniu wodą w przypadku próbek bez obciążenia wskazują na konieczność ochrony przed dostępem wody w przypadku jej wykorzystania do budowy nasypów drogowych.

LITERATURA

1. Batóg A., Hawrysz M.: Przydatność mieszanek popiołowo-gruntowych do budowy nasypów komunikacyjnych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34, 2, 2010, 69-75.
2. Borowski G.: Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. *Inżynieria Ekologiczna*, 22, 2010, 52-62.
3. Cyske W.: Wykorzystanie kruszywa z ubocznych produktów spalania w budowie dróg. *Kruszywa. Produkcja – Transport – Zastosowanie*, 2, 2011, 36-42.
4. Czyż E.: Parametry kontaktu międzyfazowego wybranych materiałów stosowanych w budownictwie ziemnym. Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, praca magisterska, maszynopis, 2016.
5. Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.: Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 1, 2005, 23-42.
6. Garlikowski D., Orzeszyna H., Lejcuś K., Pawłowski A.: Podatność na działanie mrozu wybranych odpadów z sektora gospodarczego. *Inżynieria Ekologiczna*, 18, 2007, 66-67.
7. Gruchot A.: Utylizacja odpadów powęglowych i poenergetycznych do celów inżynierskich jako czynnik kształtowania i ochrony środowiska. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Rozprawy*, 2016.
8. Gruchot A., Grzyb. J., Zydroń T.: Influence of loading on the CBR ratio of fuel ashes from the „Skawina” Power Plant. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 33, 2, 2011, 3-14.
9. Gruchot A., Wójtowicz A.: Wpływ obciążenia i wilgotności na wartości wskaźnika nośności mieszaniny popiołowo-żużłowej ze składowiska elektrowni „Skawina”. *Przegląd Górniczy*, 4, 2014, 81-85.
10. Gruchot A., Zawisza E., Czyż E.: Parametry kontaktu międzyfazowego wybranych materiałów stosowanych w budownictwie ziemnym. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture* 64 (3/1/17), 103-114, DOI: 10.7862/rb.2017.107, 2017.
11. Gruchot A., Zawisza E., Soliński S.: Wpływ wilgotności i obciążenia na wskaźnik nośności mieszaniny popiołowo-żużłowej. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 3, 2017.
12. GUS 2017. Mały rocznik statystyczny Polski. Zakład Wydawnictw Statystycznych. Warszawa.
13. Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.: Energetyka a ochrona środowiska. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1997.
14. Machniak Ł., Kozioł W.: Kruszywa alternatywne – baza zasobowa i kierunki wykorzystania w budownictwie. *Kruszywa*, 4, 2014, 28-33.
15. Pisarczyk S.: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
16. PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacji. Warszawa.
17. PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania. Komitet Normalizacji Miar i Jakości. Warszawa.
18. Rosik-Dulewska C.: Podstawy gospodarki odpadami. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010.
19. Sas W., Szymański A., Malinowska E., Gabryś K.: Geotechniczne uwarunkowania zastosowania materiałów antropogenicznych w budownictwie. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4, 2014, 376-389.
20. Szydło A.: Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żużłowych z Elektrociepłowni Wrocław w budownictwie drogowym. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary, 2003, 93-111.
21. Zabielska-Adamska K.: Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających. *Rozprawy Naukowe*, 136, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2006.
22. Zawisza E.: Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubokuchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Rozprawy* 280, 2001.
23. Zawisza E., Gruchot A., Michalski P.: Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 27, 1, 2006, 22-30.