



Wskaźnik nośności CBR kompozytów z odpadów powęglowych i popiołu lotnego

California Bearing Ratio of composites from colliery spoils and fly ash

Dr inż. Andrzej Gruchot^{*)}

Treść: W pracy przedstawiono wyniki badań wskaźnika nośności CBR nieprzepalonych odpadów powęglowych pochodzących ze składowiska KWK „Rydułtowy-Anna”, popiołu lotnego ze zsypu z elektrofiltrów Elektrowni „Skawina” oraz ich kompozytów. Kompozyty przygotowano przy 10, 20 i 30% dodatku popiołów w stosunku do suchej masy odpadów powęglowych. Stwierdzono znaczące zwiększenie wskaźnika nośności kompozytów odpadów powęglowych z popiołem lotnym w stosunku, tak do odpadów powęglowych, jak i popiołu lotnego. Najwyższe jego wartości w zależności od obciążenia próbek uzyskano dla kompozytów z 10-procentowym bądź 20-procentowym dodatkiem popiołu.

Abstract: This paper presents the research results of CBR ratio of unburnt colliery spoils from KWK “Rydułtowy-Anna” landfill, fly ash “Skawina” Power Plant and their composites. The composites were prepared with 10%, 20% and 30% addition of fly ash in relation to dry mass of the colliery spoils. A significant increase in bearing ratio of the composites was stated in relation to the values obtained for both colliery spoils and fly ash. The highest values, depending on the load of samples were obtained for composites with 10% or 20% addition of fly ash.

Słowa kluczowe:

odpady powęglowe, popiół lotny, kompozyty, wskaźnik nośności CBR

Key words:

colliery spoils, fly ash, composites, CBR ratio

1. Wprowadzenie

W Polsce produkcja energii elektrycznej i ciepłej opiera się głównie na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego. Szacuje się, że zużycie węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych wynosi około 50 mln ton rocznie, a brunatnego ponad 60 mln ton [1]. Powoduje to powstawanie odpadów związanych z wydobywaniem węgla, a także jego spalaniem. Materiały te jednak są coraz częściej postrzegane nie jako odpady, ale cenny materiał lub surowiec stanowiący substytut gruntów mineralnych, tak gruboziarnistych (łupki przywęglowe), jak i drobnoziarnistych (odpady poenergetyczne). Takie podejście powoduje ograniczenie objętości składowanych materiałów, a co za tym idzie ochronę zasobów naturalnych i ograniczenie wpływu składowisk na środowisko naturalne [10].

Odpady powęglowe stanowiące mieszaninę płonnej skały karbońskiej są wykorzystywane głównie do celów budownictwa drogowego i hydrotechnicznego jako kruszywo sztuczne, z którego można budować ziemne nasypy drogowe czy też obwałowania cieków [3, 6, 7]. Wymaga to jednak właściwego rozpoznania geotechnicznego tych materiałów ze względu na złożony skład petrograficzny i tym samym zmienność ich właściwości geotechnicznych. Wpływa to także na przyjęcie właściwej technologii ich wbudowywania w nasyp, dostosowanej do typu odpadów powęglowych (przealone, nieprzealone) i rodzaju obiektu.

Odpady poenergetyczne (uboczne produkty spalania) są materiałem o szerokim zakresie uziarnienia i dość dużej zmienności właściwości fizycznych, chemicznych jak i geotechnicznych. Jest to uzależnione od rodzaju zastosowanego paliwa (węgiel, biomasa), technologii jego przygotowania, metody spalania (kotły tradycyjne, fluidalne) oraz sposobu odbioru, transportu i składowania odpadów. Największym odbiorcą odpadów najdrobniejszych, a więc popiołu lotnego jest przemysł budowlany oraz cementownie. Materiał grubszy może być stosowany do celów budownictwa drogowego, głównie na dolne warstwy nasypów poniżej strefy przemarzania lub na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania pod warunkiem izolowania ich od wpływu wody. Należy jednak zaznaczyć, że podbudowy dróg, a tym samym materiał, z którego są wykonane musi być odporny na działanie czynników klimatycznych – wysokie lub niskie temperatury, czy też cykle zamrażanie-odmrażanie. W konsekwencji materiały te muszą przejść pozytywną weryfikację w aspekcie ich właściwości geotechnicznych. Wykorzystanie odpadów poenergetycznych to nie tylko zastosowanie ich jako materiału samodzielnego do formowania np. nasypów, ale także wzmacnianie słabonośnego naturalnego podłoża drogowego poprzez jego stabilizację np. popiołami lotnymi [2, 5, 8].

Chcąc zwiększyć zakres stosowania odpadów przemysłowych do celów budownictwa ziemnego, można także wpływać na ich właściwości geotechniczne przez stosowanie mieszanek odpadów [4, 9]. Pozwala to zwiększyć szczelność odpadów, polepszyć ich nośności czy też zwiększyć wytrzymałość na ścinanie.

^{*)} Uniwersytet Rolniczy, Kraków

2. Cel i metody badań

Celem badań było określenie nośności mieszanek wybranych odpadów powęglowych z popiołami lotnymi w aspekcie ich wykorzystania jako kompozytów z gruntów antropogenicznych do wznoszenia nasypów budownictwa drogowego. Badania obejmowały oznaczenie charakterystyki geotechnicznej oraz wskaźnika nośności CBR nieprzepalonych odpadów powęglowych pochodzących ze składowiska KWK „Rydułtowy-Anna”, popiołu lotnego ze zsypu z elektrofiltrów Elektrowni „Skawina” oraz ich kompozytów. Kompozyty przygotowano przy 10, 20 i 30% dodatku popiołów w stosunku do suchej masy odpadów powęglowych.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia odpadów oznaczono metodą sitową dla ziarn 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 dla odpadów powęglowych i ich mieszanek oraz 1,0 dm³ dla popiołów lotnych, przy energii zagęszczania 0,59 J×cm⁻³.

Badania wskaźnika nośności CBR przeprowadzono na próbkach odpadów powęglowych i ich mieszanek o uziarnieniu mniejszym od 31,5 mm zgodnie z normą [PN-S-02205:1998] oraz na próbkach popiołów lotnych o pełnym uziarnieniu. Wilgotność wyjściową wyznaczono zgodnie z normą [PN-S-02205:1998] z krzywej zagęszczalności i odpowiadała ona 99% wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu. Wskaźnik zagęszczenia próbek wynosił od 0,97 do 0,99.

Wartości wskaźnika nośności określono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasączenia wodą [12], bez obciążenia i przy obciążeniu siłą 22 i 44 N przy 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 próbek wodą rejestrowano zmiany ich wysokości co pozwoliło określić wielkość pęcznienia liniowego wyrażonego w procentach jako stosunek przyrostu wysokości do początkowej wysokości próbki. Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono w oparciu o wartości średnie wskaźnika nośności z co najmniej dwóch powtórzeń i wilgotność w strefie penetracji trzpienia.

3. Wyniki badań i ich analiza

3.1. Podstawowe właściwości geotechniczne

W składzie uziarnienia odpadów powęglowych dominowała frakcja zwirowa, której udział wynosił 88%, frakcji piaskowej było blisko 9%, pyłowej ponad 2%, a ilowej ponad 1% (rys. 1). Według nomenklatury geotechnicznej uziarnienie odpadów powęglowych odpowiadało kilkufrakcyjnym zwirom średnim (tab. 1). W przypadku popiołów lotnych przeważała frakcja pyłowa, której zawartość wynosiła ponad 86%, udział frakcji piaskowej wynosił 8%, a ilowej ponad 5%. Pod względem geotechnicznym popiół lotny został sklasyfikowany jako jednofrakcyjny pył.

W składzie uziarnienia kompozytów odpadów powęglowych z popiołem dominowała frakcja zwirowa, której zawartość zmniejszała się wraz ze wzrostem zawartości popiołu i wynosiła od 74% przy dodatku popiołu 10% do około 64% przy dodatku 30% popiołu (rys. 1). Zawartość frakcji piaskowej wahała się w przedziale od 10 do 14%, podobnie pyłowej – od 10 do 18%, a ilowej zwiększała się od około 2% do blisko 7% wraz ze wzrostem dodatku popiołu (tab. 1). Według nomenklatury geotechnicznej mieszanka odpadów powęglowych z dodatkiem 10% popiołów odpowiadała zwirom średnim, z dodatkiem 20% - zwirom pylastym, a z dodatkiem 30% - zwirom ilastym. Wskaźnik różnoziarnistości wynosił od 400 do 1481, co pozwoliło określić mieszanki jako wielofrakcyjne.

Gęstość właściwa szkieletu odpadów powęglowych wynosiła 2,37 g×cm⁻³, popiołu lotnego była znacznie mniejsza i wynosiła około 2,24 g×cm⁻³. W przypadku kompozytów odpadów powęglowych z popiołem gęstość właściwa szkieletu wynosiła średnio 2,28 g×cm⁻³.

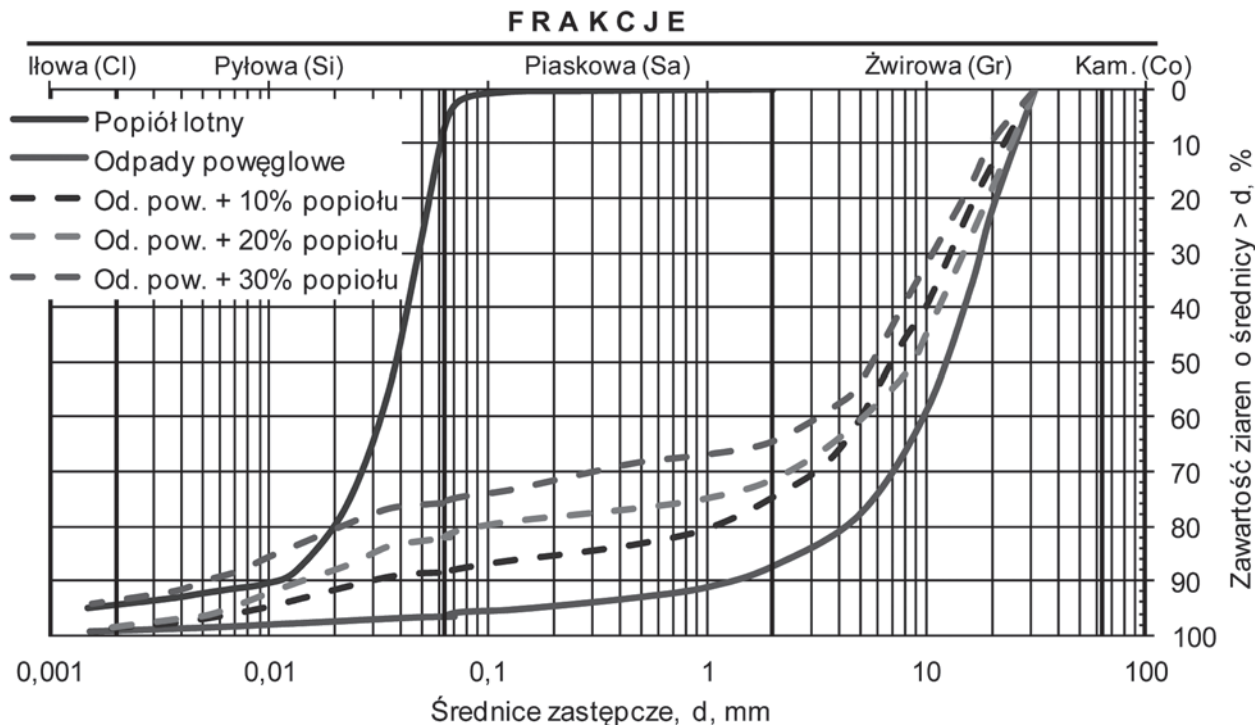
3.2. Parametry zagęszczalności

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadów powęglowych była wysoka i wynosiła 1,83 g·cm⁻³, a popiołu lotnego znacznie niższa, bo wynosząca średnio 1,12 g·cm⁻³ (rys. 2). Dodatek popiołu w ilości 10% do odpadów powęglowych spowodował wzrost analizowanego parametru o 0,12 g·cm⁻³ w stosunku do odpadów bez dodatku popiołu. Zwiększenie udziału popiołu do 20 i 30% w odpadach powęglowych spowodowało zmniejszenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu o ponad 0,2 g·cm⁻³ w stosunku do wartości maksymalnej uzyskanej przy 10% dodatku popiołu i 0,1 g·cm⁻³ w stosunku do odpadów bez dodatku popiołu (rys. 3a).

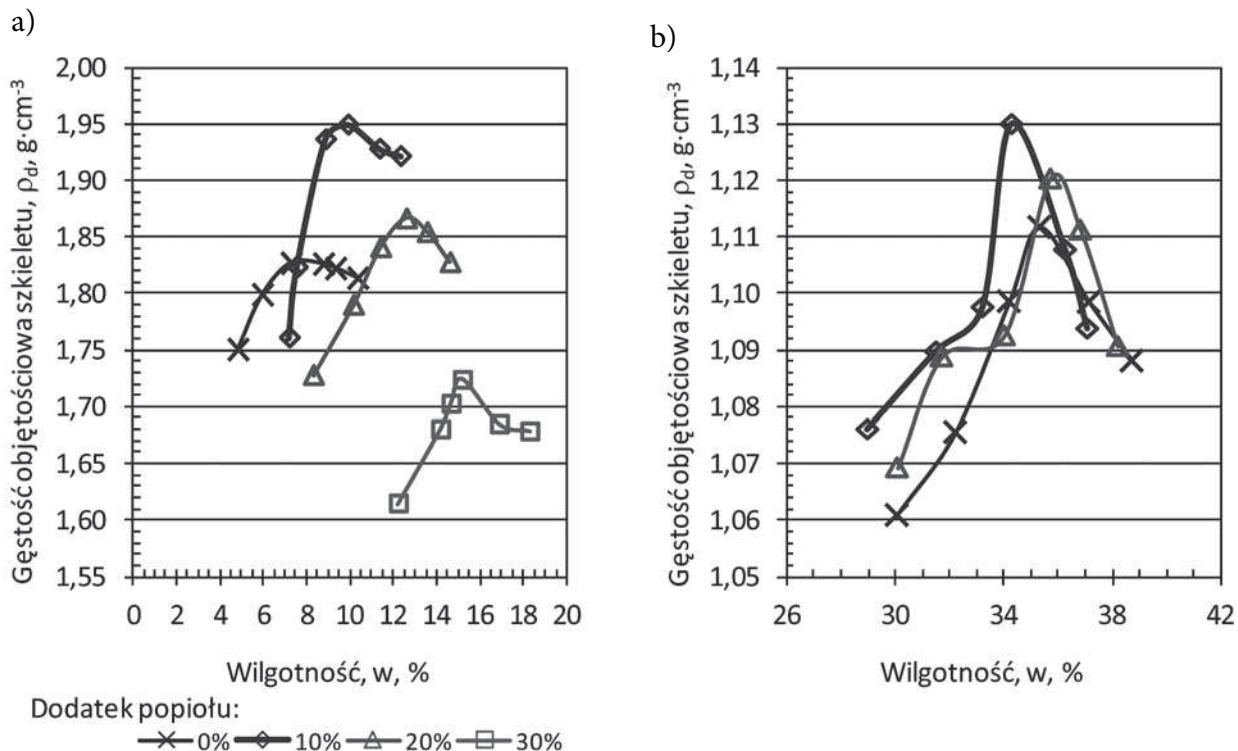
Tabela 1. Skład uziarnienia i podstawowe właściwości fizyczne badanych materiałów

Table 1. Composition of grain-size distribution and essential properties of the tested materials

Parametr	Odpady powęglowe	Popiół lotny	Kompozyty odpadów powęglowych z dodatkiem popiołu w ilości		
			10%	20%	30%
Zawartość frakcji, %					
– zwirowa, Gr: 63 ÷ 2 mm	88,0		74,0	71,5	64,0
– piaskowa, Sa: 2 ÷ 0,063 mm	8,5	8,0	14,0	10,5	11,5
– pyłowa, Si: 0,063 ÷ 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 [11]	MGr	Si	MGr	siGr	clGr
Wskaźnik różnoziarnistości, C _u [-]	11,1	3,6	400	667	1481
Wskaźnik krzywizny uziarnienia, C _c [-]	2,3	141,1	26,7	40,0	2,6
Gęstość właściwa szkieletu, ρ _s , g×cm ⁻³	2,37	2,24	2,27	2,28	2,29
Wilgotność optymalna, w _{opt} , %	7,80	34,40-35,90	9,60	12,70	15,20
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, ρ _{ds} , g×cm ⁻³	1,83	1,11-1,13	1,95	1,865	1,725



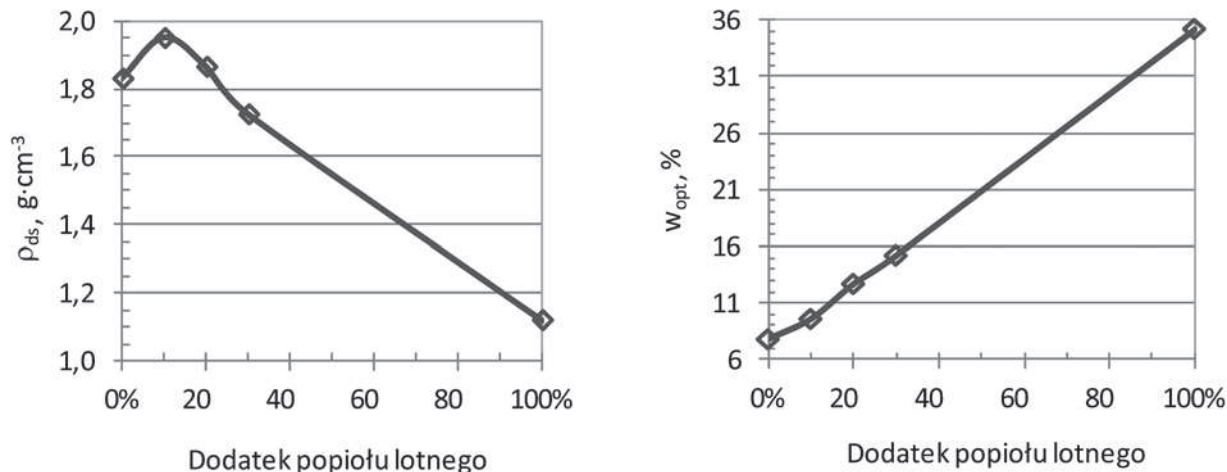
Rys. 1. Krzywe uziarnienia badanych materiałów
 Fig. 1. Size distribution curves of the tested materials



Rys. 2. Krzywe zagęszczalności badanych materiałów
 a) odpady powęglowe i ich kompozyty z popiołem lotnym b) popiół lotny
 Fig. 2. Compactability curves of the tested materials

Wilgotność optymalna odpadów powęglowych wyniosła 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. 3b).



Rys. 3. Wpływ dodatku popiołu lotnego na parametry zagęszczalności badanych materiałów a) maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, b) wilgotność optymalna
 Fig. 3. Impact of the addition of fly ash on the compactability parameters of the tested materials a) maximum dry density of solid particles, b) optimum moisture content

3.3. Wskaźnik nośności CBR

Odpady powęglowe

Wskaźnik nośności odpadów powęglowych poddanych badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu wahał się od około 18 do nieco ponad 29% przy wzroście obciążenia od 0 do 44 N (tab. 2). Nasączenie próbek wodą spowodowało zwiększenie wilgotności o około 2% oraz zmniejszenie wskaźnika nośności o około 3 do 4% (rys. 4) dla wszystkich zastosowanych obciążeń.

3.4. Popiół lotny

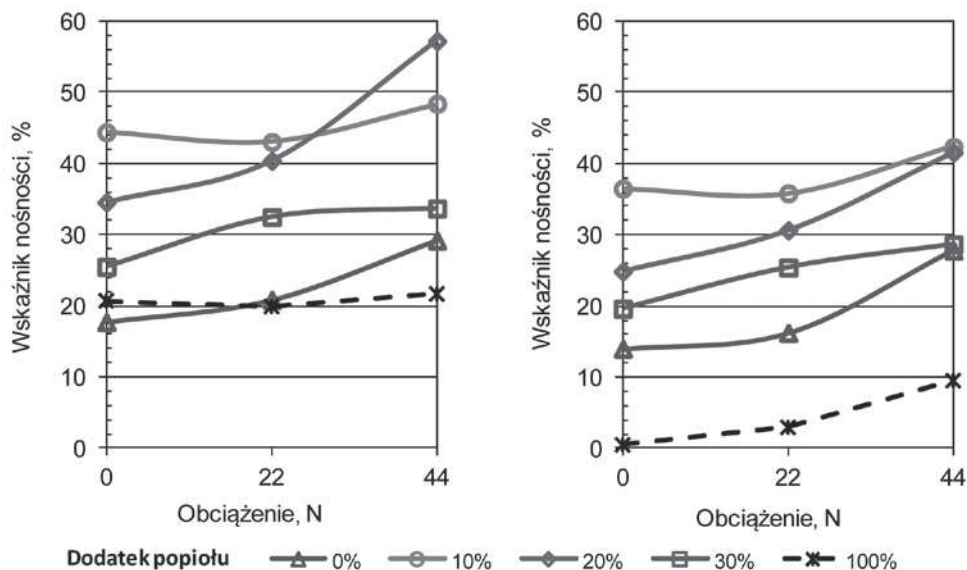
Wskaźnik nośności CBR próbek popiołu lotnego poddanych badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu w badaniach bez i z obciążeniem wynosił średnio nieco ponad 20%. Wartości te były zbliżone do wskaźnika nośności uzyskanego dla odpadów

powęglowych (rys. 4). Nie zaobserwowano istotnych zmian w wartościach wskaźnika nośności na skutek zwiększenia obciążenia od 0 do 44 N.

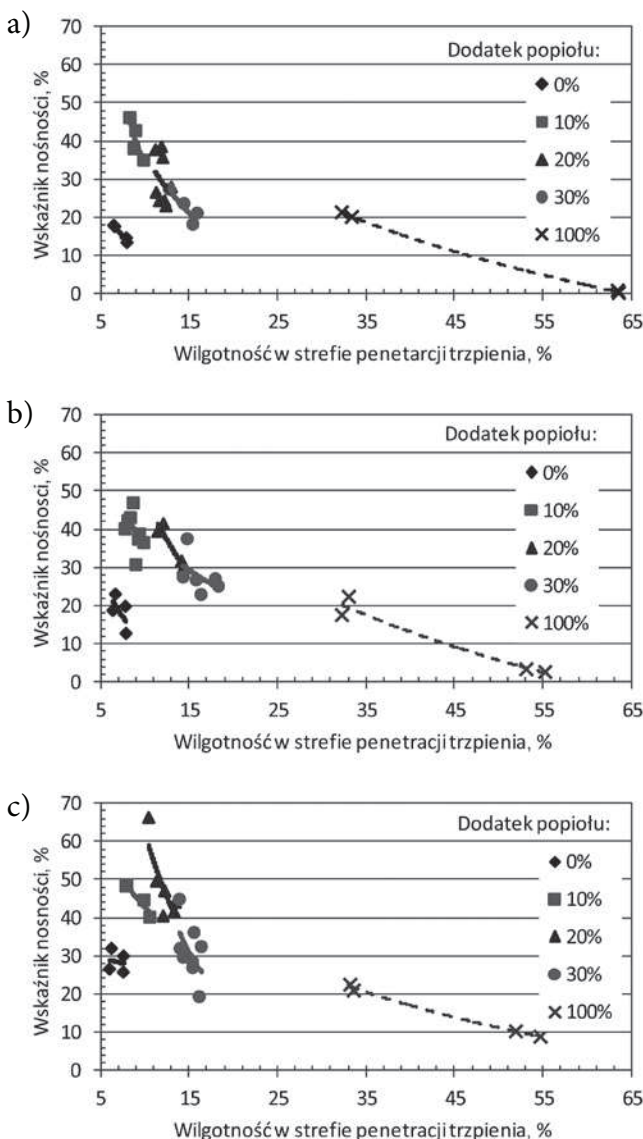
Po 4 dobach nasączenia wodą wilgotność popiołu zwiększyła się 2-krotnie dla próbek bez obciążenia (do ponad 63%) oraz średnio 1,6-krotnie (do około 53%) przy obciążeniu próbek siłą 22 i 44 N. Tak duże zwiększenie wilgotności spowodowało utratę nośności dla próbek popiołu bez obciążenia, a w badaniach z obciążeniem zmniejszenie wskaźnika nośności do 3% przy obciążeniu siłą 22 N i blisko 10% przy obciążeniu siłą 44 N. W oparciu o przeprowadzone badania, stwierdzono istotny wpływ wilgotności, ale także i obciążenia na uzyskane wartości wskaźnika nośności. Wzrost obciążenia próbek popiołu spowodował dość znaczne ograniczenie zmniejszenia wskaźnika nośności na skutek nasączenia popiołu wodą (rys. 5).

Tabela 2. Średnie wartości wskaźnika nośności CBR i pęcznienia liniowego badanych materiałów
 Table 2. Mean values of CBR and linear expansion of the tested materials

Materiał	Czas nasączenia wodą t doby	Wilgotność w strefie penetracji trzpienia, %			Wskaźnik nośności w _{nos} , %			Pęcznienie liniowe p, %			
		Obciążenie próbek, N									
		0	22	44	0	22	44	0	22	44	
Odpady powęglowe	0	6,6	6,6	6,2	17,8	20,9	29,2	-			
	4	8,0	7,9	7,6	14,0	16,3	27,8	-0,01	0,02	0,02	
Popiół lotny	0	32,9	32,7	33,4	20,7	19,9	21,7	-			
	4	63,5	54,2	53,3	0,5	3,0	9,5	12,71	4,71	2,44	
Kompozyty odpadów powęglowych z dodatkiem popiołów w ilości:	10%	0	8,7	8,3	7,9	44,4	43,1	48,4	-		
		4	9,4	9,4	10,3	36,5	35,9	42,4	0,07	0,01	0,01
	20%	0	11,6	11,8	11,4	34,6	40,4	57,2	-		
		4	12,4	14,3	13,0	24,9	30,7	41,6	0,18	0,01	0,02
	30%	0	13,6	14,6	14,4	25,5	32,5	33,7	-		
		4	15,7	17,1	15,9	19,7	25,4	28,7	0,27	0,13	0,09



Rys. 4. Wpływ obciążenia na wskaźnik nośności CBR badanych materiałów, a) bezpośrednio po zagęszczeniu, b) po nasączeniu wodą
 Fig. 4. Impact of load on the CBR of the tested materials



3.5. Kompozyty z odpadów powęglowych i popiołu lotnego

Wskaźnik nośności kompozytów odpadów powęglowych z popiołem lotnym zależał głównie od procentowego udziału popiołu. W mniejszym zakresie stwierdzono wpływ wilgotności wynikający z 4-dobowego czasu nasączenia próbek wodą oraz obciążenia. Zakres wartości wskaźnika nośności wahał się od blisko 26 do nieco ponad 57% (tab. 3). Najwyższą wartość uzyskano dla kompozytu z dodatkiem 20% popiołów przy obciążeniu siłą 44 N, a najniższą przy 30% dodatku popiołu i próbek bez obciążenia.

Wskaźnik nośności próbek po 4-dobowym czasie nasączenia wodą zmniejszył się i wahał się od 20 do ponad 42%. Również i w tych badaniach najwyższą wartość stwierdzono przy obciążeniu siłą 44 N i dodatku 10% popiołu, a najniższą dla próbek bez obciążenia i przy 30% dodatku popiołu. Wartości te były mniejsze od około 5 do blisko 16% w stosunku do próbek poddanych badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu przy nieznacznym, bo około 2% wzroście wilgotności w strefie penetracji trzpienia (rys. 5).

Analizując wpływ obciążenia na wartości wskaźnika nośności kompozytów z obydwu odpadów stwierdzono jego zwiększenie wraz ze wzrostem obciążenia od 0 do 44 N. Dla kompozytów z dodatkiem popiołu w ilości 10 i 30% zwiększenie wskaźnika nośności wyniosło średnio około 5% dla próbek bezpośrednio po zagęszczeniu i 8% dla próbek po 4-dobowym czasie nasączenia wodą. Natomiast przy 20% dodatku popiołu było to zwiększenie o blisko 20%.

Rys. 5. Wpływ wilgotności na wskaźnik nośności CBR badanych materiałów a) bez obciążenia b) obciążenie 22 N c) obciążenie 44 N
 Fig. 5. Impact of humidity on the CBR of the tested materials a) no load b) load of 22N c) load of 44N

3.6. Pęcznienie liniowe

Pęcznienie liniowe odpadów powęglowych było pomijalnie małe, a popiołu lotnego duże i wahało się od blisko 13% dla próbek bez obciążenia do blisko 3% przy obciążeniu 44 N. Stwierdzono, że wzrost obciążenia w znaczący sposób ograniczył pęcznienie popiołu lotnego. Natomiast pęcznienie liniowe kompozytów odpadów powęglowych z popiołami było niewielkie i nie przekroczyło 0,3%. Stwierdzono jego zwiększenie wraz ze wzrostem dodatku popiołów oraz zmniejszenie wraz ze wzrostem obciążenia.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono znaczące zwiększenie wskaźnika nośności kompozytów odpadów powęglowych z popiołem lotnym w stosunku, tak do odpadów powęglowych, jak i popiołu lotnego. Należy wskazać, że najwyższe wartości wskaźnika nośności uzyskano dla kompozytów z 10-proc. dodatkiem popiołu – próbki bez obciążenia i z obciążeniem siłą 22 N bądź 20-proc. dodatkiem popiołu – próbki z obciążeniem siłą 44 N. Dlatego dobierając skład mieszanki kompozytu oprócz ilości dodatku popiołu należy także uwzględnić wielkość obciążenia.

Podsumowując, można stwierdzić, że badane odpady powęglowe, popioły lotne i ich kompozyty przy wilgotności zbliżonej do optymalnej charakteryzują się dużymi wartościami wskaźnika nośności. Należy jednak wbudowywać je w warstwy powyżej zwierciadła wody, ponieważ zawodnienie powoduje zmniejszenie wartości wskaźnika nośności. W przypadku popiołu lotnego nasączenie próbek wodą spowodowało prawie całkowitą utratę nośności. Dlatego też wykorzystanie popiołów do wytwarzania kompozytów z odpadami powęglowymi jest istotne i celowe, ponieważ stanowić może formę utylizacji tych odpadów przemysłowych.

Literatura

1. *Borowski G.*: Możliwości wykorzystania odpadów z energetyki do budowy dróg. „Inżynieria Ekologiczna” 2010, nr 22, s. 52-62.
2. *Filipiak J.*: Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Rocznik „Ochrona Środowiska” 2011, nr 13, s. 1043-1054.
3. *Filipowicz P., Borys M.*: Wykorzystanie odpadów przemysłowych do budowy i umacniania wałów przeciwpowodziowych. Wydawnictwo Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Rocznik „Ochrona Środowiska” 2008, nr 10, s. 633-644.
4. *Gruchot A., Klos J.*: Wpływ dodatku popiołów lotnych na wskaźnik nośności odpadów powęglowych. „Przeгляд Górniczy” 2010, nr 1-2, s. 53-56.
5. *Kraszewski C., Pachowski J.*: Popioły w drogownictwie wymagania i zastosowanie. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary 2003, s. 13-22.
6. *Pieczyrak J.*: Przydatność odpadów górnictwa węgla kamiennego w inżynierii lądowej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, „Inżynieria Środowiska” 2007, nr 54, s. 101-108.
7. *Sękowski J.*: Grunty antropogeniczne jako podłoże budowli. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, „Inżynieria Środowiska” 2007, nr 54, s. 11-128.
8. *Szydło A.*: Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żużlowych z Elektrociepłowni Wrocław w budownictwie drogowym. Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”, Licheń Stary 2003, s. 93-101.
9. *Szymkiewicz A., Hycnar J., Fraś A., Przysaś R., Józefiak T., Baic I.*: Zastosowanie popiołów fluidalnych dla zwiększenia zagospodarowania odpadów wydobywczych. „Inżynieria Mineralna” 2012, nr 1 (28), s. 19-30.
10. *Ziarkowska K., Maślanka J.*: Technologie przyjazne środowisku. XI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”. Zakopane, Wydawnictwo Ekotech, Szczecin 2004, s. 37-48.
11. PN-EN ISO 14688:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
12. PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.