



ANDRZEJ GRUCHOT

Uniwersytet Rolniczy
w Krakowie
rmgrucho@cyf-kr.edu.pl



PAWEŁ SIECZKA

Przedsiębiorstwo
Inżynierii Ochrony
Środowiska i Melioracji
„HYDROMEL” Sp. z o.o
sieczkap@tlen.pl

Wpływ zbrojenia rozproszonego na właściwości geotechniczne popiołu lotnego

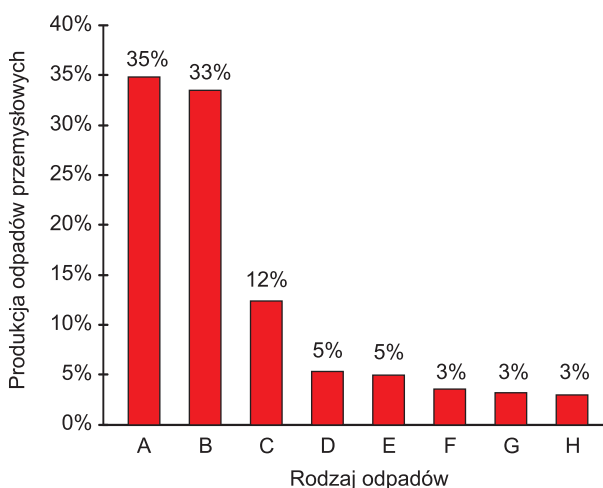
Według Głównego Urzędu Statystycznego w roku 2011 wytworzono 123,5 mln ton odpadów, w tym około 113 mln ton odpadów przemysłowych, z tego około 74%(m/m) zostało poddanych odzyskowi, a około 23%(m/m) unieszkodliwiono [2]. Dominują odpady z płukania i oczyszczania spalin i z flotacyjnego wzbogacania rud (prawie po 25%(m/m), a odpady poenergetyczne z produkcji energii elektrycznej i ciepłej stanowią 17%(m/m) (rysunek 1).

Ocenia się, że przy produkcji 1 kWh energii wytwarzanych jest od 35 do 220 g odpadów poenergetycznych [7]. Odpady te stanowią tzw. uboczne produkty spalania (UPS) w postaci

popiołów lotnych, żużli, mieszanin popiołowo-żużłowych, mikroster, popiołów z kotłów fluidalnych, gipsów z odsiarczania

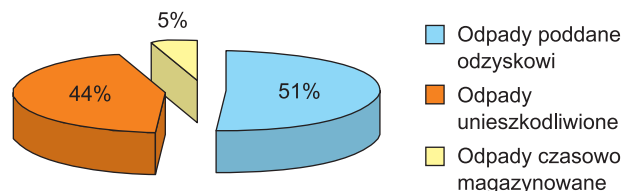
spalin metodą moką wapienną oraz odpadów z odsiarczania spalin metodami półsuchymi i suchymi. Wytwarzane w procesach spalania odpady powstają na skutek występowania w węglu znacznych ilości substancji niepalnych, których zawartość w węglu kamiennym waha się od 11 do 17%(m/m), a w węglu brunatnym – od 3 do 11%(m/m)[1].

Składowanie tych odpadów na składowiskach jest rozwiązaniem nie tylko nieefektywnym, ale przede wszystkim mającym negatywny wpływ na środowisko naturalne. Dlatego jednym z działań polityki ekologicznej jest podjęcie próby ich zagospodarowania. Odpady poenergetyczne mają zastosowanie w takich gałęziach przemysłu jak górnictwo, budownictwo, roboty inżynieryjno-drogowe oraz rolnictwo. Dzięki zastosowaniu odpowiednich procesów odpady są ponownie wykorzystywane między innymi jako surowce do produkcji półprefabrykatów, materiały do budowy dróg lub rekultywacji terenów zdegradowanych. Szacuje się, że około 50%(m/m) odpadów z energetyki poddawanych jest odzyskowi (rysunek 2) [2].



- A. Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych
- B. Odpady powstające przy płukaniu i oczyszczaniu kopalni
- C. Mieszanki popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych
- D. Popioły lotne z węgla
- E. Mieszanki z popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania
- F. Żużle wielkopieczowe i stalownicze
- G. Żużle popioły paleniskowe i pyły z kotłów
- H. Odpady z wydobywania kopalni innych niż rudy metali

Rys. 1. Udział poszczególnych rodzajów odpadów w ogólnej ilości odpadów przemysłowych wytworzonych w 2011 roku [2]



Rys. 2. Zagospodarowanie odpadów poenergetycznych w 2011 roku [2]

Wykorzystanie odpadów poenergetycznych zależy przede wszystkim od właściwości fizycznych, chemicznych oraz geotechnicznych, te natomiast uzależnione są od rodzaju zastosowanego paliwa (węgiel, biomasa) i technologii jego przygotowania, spalania oraz sposobu odbioru, transportu i składowania odpadów.

Jednym z cenniejszych UPS są popioły lotne wychwytywane w procesie spalania węgla metodą mechaniczną lub elektrostatyczną. Prowadzone od lat badania nad właściwościami odpadów paleniskowych wykazały możliwość szerokiego ich wykorzystania w takich dziedzinach gospodarki jak [1, 11, 12]:

- górnictwo podziemne (wypełnianie pustek poeksploatacyjnych w kopalniach, mechaniczne wzmocnianie górotworu, likwidacja zagrożenia pożarowego),
- przemysł materiałów budowlanych (produkcja klinkieru cementu portlandzkiego, cementów, betonów, kruszyw lekkich, wyrobów ceramiki budowlanej),

- roboty inżynierskie i drogowe (uszczelnianie wałów przeciwpowodziowych, ulepszenie i stabilizacja gruntów, budowa i rekultywacja składowisk odpadów, budowa nasypów, makroniwelacja terenu),
- gospodarka ściekowa (neutralizacja ścieków i szlamów),
- rolnictwo i ogrodnictwo (odkwaszanie gleb).

Cel i metodyka badań

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu dodatku zbrojenia rozproszonego w formie włókien, ang. *High Grade*, w ilości 0,1, 0,3, 0,5 i 1,0%(m/m) na wartości parametrów charakteryzujących zagęszczalność, wytrzymałość na ścinanie, nośność i pęcznienie liniowe. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla kamiennego w Elektrowni „Skawina”, pobranego ze zsypu przy elektrofiltrach.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład ziarnowy określono metodą łączoną, to jest sitową ziaren o $d \geq 0,063$ mm oraz areometryczną do ziaren o $d < 0,063$ mm, a gęstość właściwą szkieletu metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora, w cylindrze o objętości 1 dm^3 przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Oznaczenie wskaźnika nośności CBR przeprowadzono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasączenia wodą z obciążeniem o wielkości 22 i 44 N przy penetracji trzpienia o powierzchni 20 cm^2 do głębokości 2,5 i 5,0 mm z prędkością $1,25 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ [10]. Jako wartość miarodajną przyjęto wyższą wartość wskaźnika nośności. W trakcie procesu nasączenia rejestrowano wielkość przyrostu wysokości próbki spowodowanego nasyceniem jej wodą. Pęcznienie liniowe określono jako stosunek przyrostu wysokości do początkowej wysokości próbki i wyrażono w procentach. Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono w oparciu o wartości średnie wskaźnika nośności i wilgotności w strefie penetracji trzpienia nieprzekraczającej 30 mm. Wilgotność wyjściową popiołu do badania wyznaczono zgodnie z normą [PN-S-02205:1998] z krzywej zagęszczalności i odpowiadała ona wilgotności przy 99% wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu. W przypadku analizowanego popiołu lotnego i przyjętych dodatków zbrojenia była ona niższa o około 1,5%(m/m) od wilgotności optymalnej. Wskaźnik zagęszczenia próbek wyniósł od 0,97 do 0,99.

Oznaczenie wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach popiołu bez dodatku zbrojenia, o wymiarach $8 \times 8 \times 4,6 \text{ cm}$ oraz na próbkach popiołu ze zbrojeniem, o wymiarach $12 \times 12 \times 6,7 \text{ cm}$. Próbki do badań formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,9$ i 1,0 oraz wilgotności zbliżonej do optymalnej. Próbki ścinano przy prędkości $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ i naprężeniach normalnych w zakresie od 50 do 300 kPa do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Obliczenia parametrów wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono dla kryterium ścięcia odpowiadającemu wartości maksymalnej naprężeń ścinających [8].

Charakterystyka zbrojenia rozproszonego

Do badań zostało użyte zbrojenie rozproszone w formie nacinanych wzdłużnie (fibrylowanych), wiązkwanych uszlachetnionych włókien (ang. *Fibrofor High Grade*) (fot. 1). Są one stosowane standardowo do konstrukcyjnego zbrojenia betonu oraz produkcji betonu pompowego, natryskowego, produkcji prefabrykatów, do wykonywania płyt fundamentowych lub posadzek przemysłowych [5]. Podstawowe właściwości fizyczne włókien *Fibrofor High Grade* zestawiono w tabeli 1.



Fot. 1. Zbrojenie rozproszone Fibrofor High Grade (fot. P. Sieczka)

Tabela 1. Właściwości fizyczne włókien *High Grade* [5]

Lp.	Parametr	Opis
1	Materiał	czysty, uszlachetniony poliolefin
2	Postać	włókno skręcone, fibrylowane
3	Długość	$38 \text{ mm} \pm 5\%$
4	Kolor	beżowy
5	Odporność na kwasy/zasady	obojętny
6	Siła zrywająca	około $400 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$
7	Moduł sprężystości	około $4900 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$

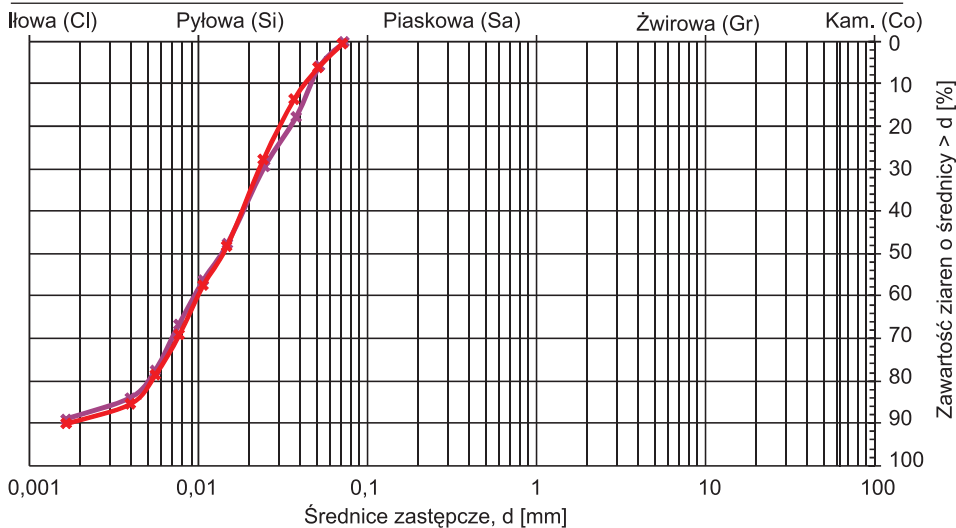
Wyniki badań i ich analiza

Podstawowe właściwości fizyczne

W składzie uziarnienia popiołu lotnego dominowała frakcja pyłowa, której zawartość wynosiła 88%(m/m). Zawartość frakcji ilowej wynosiła około 11%(m/m), natomiast udział frakcji piaskowej był niewielki i wynosił nieco ponad 1,0%(m/m) (rysunek 3.). Zgodnie z nomenklaturą geotechniczną [9] badany materiał sklasyfikowano jako różnoziarnisty, dobrze uziarniony pył ilasty (tabela 2.).

Gęstość (właściwa) popiołu lotnego wynosiła $2,18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i była zbliżona do gęstości popiołów lotnych z Elektrociepłowni „Kraków” [13, 14]. Kapilarność bierna była większa od 1,7 m, dlatego badany popiół lotny sklasyfikowano jako wysadzinowy [10].

FRAKCJE



Rys. 3. Krzywe uziarnienia popiołu lotnego

Tabela 2. Charakterystyka geotechniczna popiołu lotnego

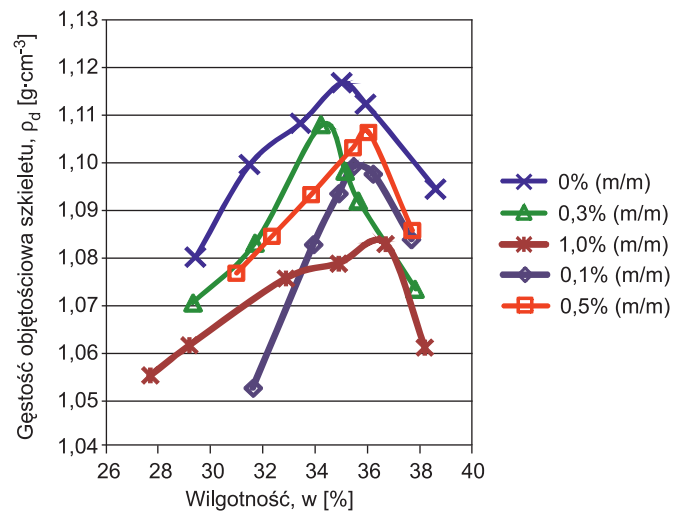
Lp.	Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość	
1	Zawartość frakcji:				
	– piaszkowa: $2 \div 0,0063$ mm	Sa	% (m/m)	1,1	
	– pyłowa: $0,063 \div 0,002$ mm	Si		88,0	
	– iłowa: $< 0,002$ mm	Cl		10,9	
2	Nazwa wg [9]			clSi	
3	Wskaźnik jednorodności uziarnienia	C_u	–	10,6	
4	Wskaźnik krzywizny uziarnienia	C_c	–	1,6	
5	Gęstość właściwa szkieletu	ρ_s	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2,18	
6	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu przy dodatku zbrojenia [% (m/m)]	ρ_{ds}	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0	1,117 [*])
				0,1	1,117
				0,3	1,107
				0,5	1,108
				1,0	1,084
7	Wilgotność optymalna przy dodatku zbrojenia przy dodatku zbrojenia [% (m/m)]	w_{opt}	% (m/m)	0	35,0 [*])
				0,1	35,70
				0,3	34,4
				0,5	35,9
				1,0	36,40
8	Kapilarność bierna	H_{kb}	m	$> 1,70$	

Parametry zagęszczalności

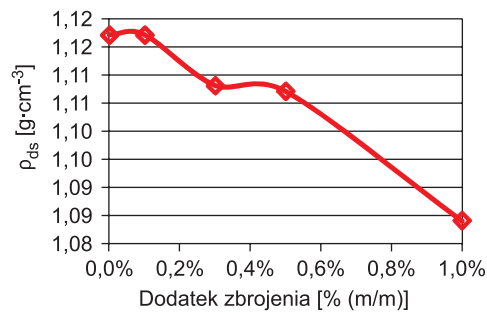
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu wynosiła $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Dodatek zbrojenia spowodował jej nieznaczne zmniejszenie do około $1,11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (rysunek 4). Wilgotność optymalna popiołu lotnego wynosiła 35% (m/m), dodatek zbrojenia spowodował niewielkie zmiany jej wartości nie przekraczające 1,5% (m/m).

Otrzymane zależności parametrów zagęszczalności od dodatku zbrojenia są podobne do podawanych przez A. Pawłowski i in. [6] do popiołu lotnego z Elektrociepłowni „Czechnica” zbrojonego mikrowłóknami polipropylenowymi w ilości 0,1 i 0,4% (m/m). Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu zmniejszyła się o około 0,03 do $0,08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a wilgotność optymalna zwiększyła się o około 5 do 10% (m/m). Autorzy wskazują na możliwość zatrzymania wody przez włókna i tym samym zmiany parametrów zagęszczalności.

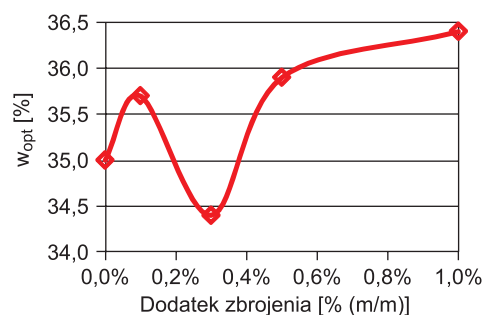
a) zależność gęstości objętościowej szkieletu od wilgotności



b) zmiany maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu



c) zmiany wilgotności optymalnej



Rys. 4. Wpływ dodatku zbrojenia na parametry zagęszczalności

Wskaźnik nośności CBR

Wskaźnik nośności popiołu lotnego bez dodatku zbrojenia wynosił około 20 i 22% odpowiednio do obciążenia 22 i 44 N. Natomiast po czterodobowym czasie nasączenia wodą zmniejszył się do 3% przy obciążeniu siłą 22 N i prawie 10% przy obciążeniu 44 N, a wilgotność wzrosła o ponad 20% (m/m) (tabela 3.). Można więc stwierdzić, że popiół lotny prawie całkowicie utracił swoją nośność.

Wskaźnik nośności próbek popiołu z dodatkiem zbrojenia rozproszonego bezpośrednio po zagęszczeniu przy obciążeniu

siłą 22 N wynosił od blisko 22 do 25% (rysunek 5). Natomiast przy obciążeniu siłą 44 N wskaźnik nośności wynosił od ponad 24 do blisko 28%. W obydwu przypadkach był on większy o kilka procent od próbek popiołu bez zbrojenia.

W wyniku czterodobowego czasu nasączenia w wodzie próbek popiołu ze zbrojeniem uzyskano wzrost wilgotności o blisko 20% (m/m). Natomiast wskaźnik nośności wyniósł od około 2 do 8% dla próbek obciążonych siłą 22 N (podobnie jak w przypadku popiołu bez zbrojenia). Dla próbek przy obciążeniu siłą 44 N wskaźnik nośności wynosił średnio około 22%, a jego zmniejszenie było niewielkie (poniżej 6%) w stosunku do próbek z obciążeniem 22 N.

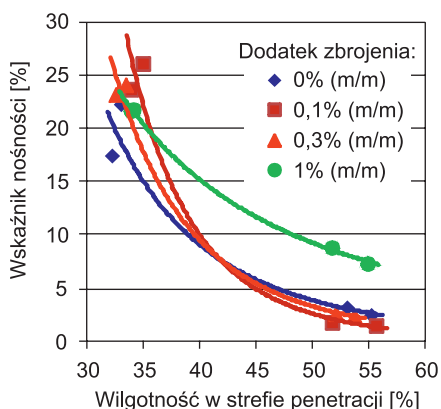
Tabela 3. Zestawienie wartości wskaźnika nośności i wilgotności popiołu lotnego z dodatkiem zbrojenia przy obciążeniu 22 i 44 N

Dodatek zbrojenia [% (m/m)]	Obciążenie 22 N				Obciążenie 44 N			
	Wilgotność w strefie penetracji trzpienia [% (m/m)]		Wskaźnik nośności [%]		Wilgotność w strefie penetracji trzpienia [% (m/m)]		Wskaźnik nośności [%]	
	badanie	średnia	badanie	średnia	badanie	średnia	badanie	średnia
Wyniki badań próbek bezpośrednio po zagęszczeniu								
0	32,3	32,7	17,5	19,9	33,6	33,4	20,9	21,7
	33,1		22,3		33,2		22,4	
0,1	34,0	34,52	23,7	24,9	-			
	35,0		26,1					
0,3	32,6	33,08	23,2	23,7	32,9	33,15	28,3	27,7
	33,5		24,1		33,4		27,0	
1,0	34,0	34,09	21,7	21,8	33,9	34,04	26,2	24,3
	34,19		21,8		34,2		22,4	
Wyniki badań próbek po 4 dobach nasączenia wodą								
0	55,3	54,2	2,6	3,0	52,0	53,3	10,2	9,5
	53,1		3,3		54,7		8,8	
0,1	51,8	53,8	1,9	1,8	-			
	55,7		1,6					
0,3	52,1	53,0	2,7	2,6	49,2	49,9	23,9	22,1
	53,8		2,5		50,7		20,3	
1,0	55,0	53,4	7,4	8,2	50,7	51,7	17,7	16,5
	51,8		8,9		52,7		15,2	

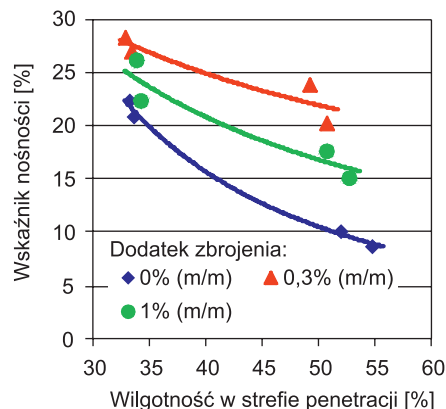
Analizując wpływ dodatku zbrojenia rozproszonego na wskaźnik nośności stwierdzono, że przy obciążeniu siłą 22 N i dodatku zbrojenia w ilości 0,1% (m/m) uzyskano najwyższy wskaźnik nośności próbek bezpośrednio po ich zagęszczeniu oraz najniższy po czterech dobach nasączenia wodą (rysunek 6a.). Natomiast przy dodatku 1,0% (m/m) zbrojenia w badaniach bezpośrednio po zagęszczeniu próbek uzyskano najniższy wskaźnik nośności w stosunku do badań popiołu z pozostałymi dodatkami zbrojenia oraz niewielkie bo 2% zwiększenie w stosunku do próbek bez zbrojenia. Przy tym samym dodatku zbrojenia, ale po czterech dobach nasączenia wodą uzyskano największy wskaźnik nośności. Biorąc pod uwagę przydatność tego typu zbrojenia do poprawy nośności popiołu lotnego optymalny wydaje się być 1% (m/m) dodatek zbrojenia przy tej wielkości obciążenia, głównie ze względu na poprawę wartości wskaźnika nośności po czterodobowym czasie nasączenia wodą.

W przypadku obciążenia siłą o wielkości 44 N uzyskano podobną zależność wskaźnika nośności od dodatku zbrojenia na próbkach poddanych badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po czterodobowym czasie nasączenia wodą. Przy dodatku 0,3% (m/m) zbrojenia stwierdzono zwiększenie wskaźnika nośności w stosunku do popiołu bez dodatku zbrojenia, a następnie jego zmniejszenie wraz ze wzrostem dodatku zbrojenia do 1,0% (m/m) (rys. 6b.). Należy zauważyć, że zwiększenie obciążenia w połączeniu z dodatkiem zbrojenia znacznie poprawiło nośność popiołu w badaniach po 4 dobach nasączenia wodą. Przy tej wielkości obciążenia optymalnym dodatkiem zbrojenia był 0,3% (m/m) dodatek, ponieważ pozwolił uzyskać najwyższe wartości wskaźnika nośności.

a) obciążenie 22 N

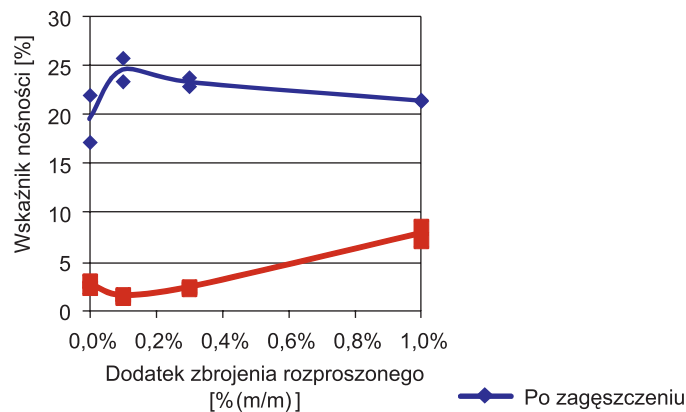


b) obciążenie 44 N

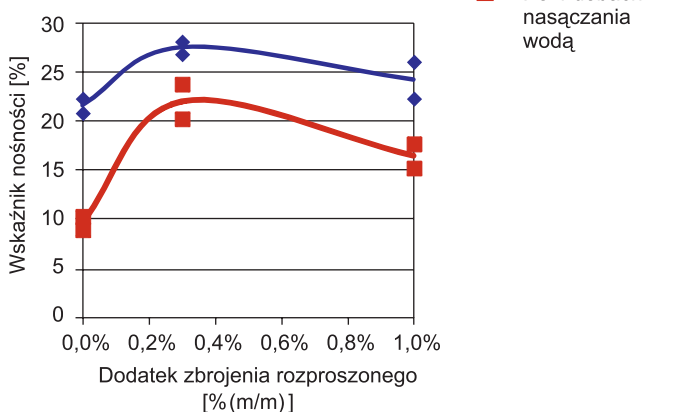


Rys. 5. Zależność wskaźnika nośności popiołu lotnego bez i z dodatkiem zbrojenia od wilgotności

a) obciążenie 22 N



b) obciążenie 44 N



Rys. 6. Wpływ dodatku zbrojenia rozproszonego na wartość wskaźnika nośności popiołu lotnego

Pęcznienie liniowe

Pęcznienie liniowe próbek popiołów lotnych po czterech dobach nasączenia wodą poddanych obciążeniu siłą 22 N wynosiło od około 2,5% przy 1%(m/m) dodatku zbrojenia do około 6% przy 0,1 i 0,3%(m/m) dodatku zbrojenia. Natomiast przy obciążeniu siłą 44 N pęcznienie wynosiło od około 2,5% w przypadku próbek bez dodatku zbrojenia do 0,5% przy 1%(m/m) dodatku zbrojenia. Tak więc dodatek zbrojenia zmniejszył w istotny sposób wielkość pęcznienia liniowego.

Należy jednak zauważyć, że większy wpływ na zmniejszenie pęcznienia liniowego miało obciążenie próbek. Przy dwukrotnym wzroście obciążenia uzyskano dwukrotne zmniejszenie pęcznienia próbek bez zbrojenia i ponad pięciokrotne z dodatkiem zbrojenia (tabela 4.).

Tabela 4. Zestawienie wielkości pęcznienia liniowego po czterech dobach nasączenia wodą

Obciążenie próbek [N]	Dodatek zbrojenia [% (m/m)]			
	0	0,1	0,3	1,0
	Pęcznienie liniowe, p [%]			
22 N	4,7	6,1	6,2	2,4
44 N	2,44	-	0,8	0,5

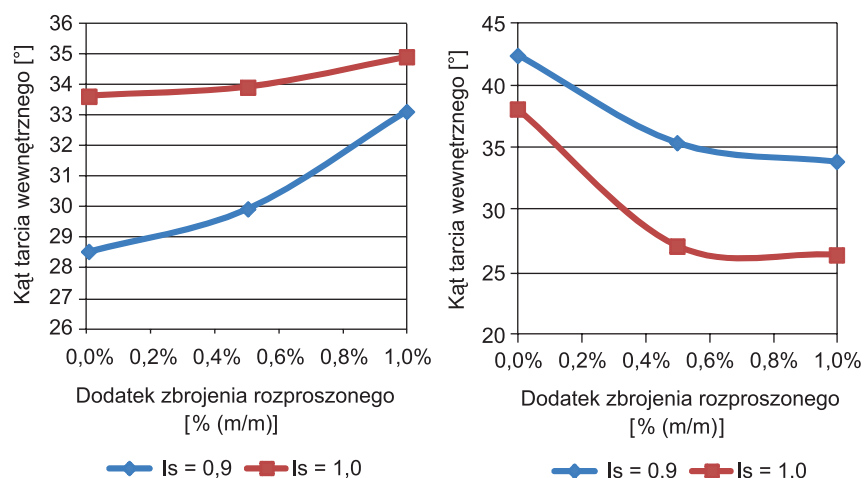
Wytrzymałość na ścinanie

Uzyskane parametry wytrzymałości na ścinanie były wysokie i w sposób istotny zależały od zagęszczenia i dodatku zbrojenia rozproszonego (tabela 5.). Wzrost zagęszczenia od $I_s = 0,9$ do 1,0 spowodował zwiększenie, o nieco ponad 5°, kąta tarcia wewnętrznego popiołu bez dodatku zbrojenia do 4 i blisko 2° przy dodatku zbrojenia odpowiednio 0,5 i 1,0% (m/m) (rysunek 7.). Natomiast spójność uległa zmniejszeniu od ponad 4 kPa dla popiołu bez zbrojenia do ponad 6 i 7 kPa dla popiołu z dodatkiem zbrojenia w ilości 0,5 i 1,0%(m/m).

Analizując wpływ dodatku zbrojenia na parametry wytrzymałości na ścinanie w zależności od wskaźnika zagęszczenia stwierdzono, że wzrost wskaźnika zagęszczenia od 0 do 1,0% spowodował zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego o blisko 5° przy mniejszym wskaźniku zagęszczenia i ponad

Tabela 5. Zestawienie parametrów wytrzymałości na ścinanie popiołu lotnego

Wskaźnik zagęszczenia I_s [-]	Kąt tarcia wewnętrznego, [°]		Spójność [kPa]	
	φ	φ_{sr}	c	c_{sr}
	badanie	średnia	badanie	średnia
Popiół lotny bez dodatku zbrojenia rozproszonego				
0,9	26,6	28,5	47,2	42,5
	30,4		37,8	
1,0	33,7	33,6	37,3	38,2
	33,5		39,0	
Popiół lotny z 0,5% (m/m) dodatkiem zbrojenia rozproszonego				
0,9	29,6	29,9	35,1	33,5
	30,2		35,9	
1,0	33,5	33,9	26,8	27,2
	34,3		27,6	
Popiół lotny z 1% (m/m) dodatkiem zbrojenia rozproszonego				
0,9	32,1	33,1	38,3	34,0
	34,0		29,7	
1,0	34,6	34,9	35,1	26,5
	35,2		17,9	



Rys. 7. Wpływ dodatku zbrojenia rozproszonego na parametry wytrzymałości na ścinanie w zależności od zagęszczenia

1° przy wyższym wskaźniku zagęszczenia (rys. 7.). Spójność uległa zmniejszeniu o ponad 8 i blisko 12 kPa odpowiednio do wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,9$ i $1,0$.

Podsumowanie

Badany popiół lotny cechuje się korzystnymi parametrami zagęszczalności, wytrzymałości na ścinanie oraz nośności przy wilgotności zbliżonej do optymalnej, wykazuje jednak nadmierne pęcznienie liniowe po nasączeniu wodą i w wyniku tego procesu praktycznie utracił nośność. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego spowodowało dość wyraźne zwiększenie wskaźnika nośności i parametrów wytrzymałości na ścinanie oraz ograniczenie pęcznienia (zwłaszcza przy dużym obciążeniu), nie wpłynęło to jednak w sposób istotny na polepszenie jego właściwości geotechnicznych.

Podsumowując można stwierdzić, że przedmiotowy popiół lotny może być stosowany jako antropogeniczny grunt budowlany do wznoszenia nasypów w miejscach izolowanych od wody. W innych przypadkach materiał ten wymaga uzdatnienia poprzez stabilizację. Jak wykazały wcześniejsze badania popiołów lotnych stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi [3, 4, 13] spełniają one odnośne wymagania dotyczące materiałów stosowanych do celów budownictwa drogowego [10].

Bibliografia

[1] K. Galos, A. Uliasz-Bocheńczyk, *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 1, s. 23-42, 2005

- [2] Główny Urząd Statystyczny, 2012. Rocznik Ochrona Środowiska 2011, Warszawa.
- [3] A. Gruchot, *Wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” stabilizowanej wapnem lub cementem*. Drogownictwo 12/2010, s. 411-415, 2010
- [4] A. Gruchot, *Wskaźnik nośności stabilizowanej mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina”*. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2011, s.182-185, 2011
- [5] Materiały informacyjne Fibrofor 2011
- [6] A. Pawłowski, D. Garlikowski, H. Orzeszyna, K. Lejcuś, *Możliwość wykorzystania zbrojenia rozproszonego do poprawy właściwości gruntów*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Oddział w Krakowie, nr 2008/09.
- [7] S. Pisarczyk, *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009
- [8] PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania
- [9] PN-EN ISO 14688:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów
- [10] PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [11] J. Pyssa, *Odpady z energetyki — przemysłowe zagospodarowanie odpadów z kotłów fluidalnych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 21, Zeszyt 3, Kraków 2005
- [12] E. Zawisza, *Analiza przydatności drobnoziarnistych odpadów przemysłowych do uszczelniania obwałowań przeciwpowodziowych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 4 (2), Kraków 2007
- [13] E. Zawisza, A. Gruchot, P. Michalski, *Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie*, Inżynieria Morska i Geotechnika. Vol. 1-2, s. 22-30, 2006
- [14] E. Zawisza, T. Zydroń, *Badania wpływu zagęszczenia i wilgotności na wytrzymałość na ścinanie popiołów lotnych*. XI Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”. Wyd. Ekotech Sp. z o.o., s. 255-266, 2004 ■



Droga ekspresowa S11 Poznań – Kórnik. Fot. Artur Gajdziński. Archiwum Transprojektu – Warszawa