



Parametry wytrzymałościowe fluidalnego popiołu lotnego z Elektrowni „Polaniec”

Andrzej Gruchot, Tymoteusz Zydroń, Elżbieta Gałowicz
Uniwersytet Rolniczy, Kraków

1. Wstęp

Produkcja energii elektrycznej i ciepłej w Polsce w znacznym stopniu oparta jest na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Przetwarzanie węgla na energię wiąże się z produkcją znacznych ilości odpadów nazywanych ubocznymi produktami spalania (UPS), do których zalicza się popioły lotne, żużle, mieszaniny popiołowo-żużlowe, mikrosfery, odpady z odsiarczania spalin [7,25,31].

Ilość ubocznych produktów spalania powstających w polskiej energetyce zawodowej stale ulega zwiększeniu. W 2013 roku powstało około 11,5 mln Mg mieszanek popiołowo-żużlowych z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych, 4,5 mln Mg popiołów lotnych oraz 3,8 mln Mg mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych [22]. Blisko 227 mln Mg mieszanek popiołowo-żużlowych z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych oraz ponad 27 mln Mg popiołów lotnych zostało nagromadzone na składowiskach. Składowanie odpadów powoduje degradację środowiska naturalnego, dlatego dąży się do ich jak największego zagospodarowania. Ocenia się, że w 2013 roku z bieżącej produkcji odzyskowi poddano tylko nieco ponad 10% mieszanek popiołowo-żużlowych oraz 87% popiołów lotnych [22]. Najszersze zastosowanie znajdują żużle i popioły lotne, które wykorzystuje się w przemyśle materiałów budowlanych, do produkcji cementu, betonów, kruszyw, cegły, materiałów termo- i hydroizolacyjnych [16,23]. W górnictwie węgla kamiennego popioły wykorzystywane są do podsadzania podziemnych wyrobisk eksplo-

atacyjnych, uszczelnienia zębów przed przenikaniem gazów i wody, wzmocnienia górotworu, izolowania pól pożarowych [18,32] oraz wykonywania iniekcji gruntowych [4,15]. W budownictwie drogowym popioły i żuźle mogą spełniać rolę kruszyw, dodatków doziarniających, dodatków pucolanowych do spoiw bądź wypełniaczy jak również są stosowane do budowy nasypów komunikacyjnych [18,33]. Popioły lotne są również wykorzystywane do wzmocnienia gruntów słabonośnych [5,6,8].

Biorąc pod uwagę zakres wykorzystania najważniejszym odpadem poenergetycznym są popioły lotne, a w ostatnim czasie popioły fluidalne powstające podczas spalania węgla w kotłach energetycznych z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Rozdrobniony węgiel wraz z dodatkiem sorbentu wdmuchiwany jest do paleniska kotła i spalany w temperaturze 780–900°C. Obniżenie temperatury wpływa na ograniczenie emisji tlenków azotu oraz utleniania się cząstek sodu i wanadu [3,11,17,24]. Właściwości popiołów zależą od pochodzenia węgla, wartości opałowej i wilgotności paliwa, sposobu rozdrobnienia paliwa, konstrukcji paleniska, sposobu wychwytywania popiołów ze strumienia spalin, sposobu odprowadzania popiołów i warunków ich przechowywania [1].

Fluidalne popioły lotne różnią się właściwościami fizyko-chemicznymi i cechami morfologicznymi od tradycyjnych popiołów powstających w paleniskach pyłowych, dotyczy to zarówno popiołów z węgla kamiennego, jak i brunatnego. Ziarna popiołów fluidalnych nie zawierają fazy szklistej, wykazują bardzo dużą porowatość otwartą, powodującą wzrost ich wodożądności. Gawlicki i Wons [9] wskazują, że w przypadku ich stosowania do produkcji spoiw lub dodatku do zapraw i betonów, powodują większy skurcz, wzrost porowatości stwardniałego zaczynu, obniżenie wytrzymałości mechanicznej oraz gorszą mrozoodporność. Skład chemiczny popiołów fluidalnych jest również inny niż popiołów krzemionkowych. Zmniejsza się zawartość SiO_2 , a wzrastają zawartości CaO i SO_3 [10,26,34].

Badania parametrów wytrzymałościowych fluidalnych popiołów lotnych są w dużej mierze skoncentrowane na określeniu wpływu ich dodatku na parametry wytrzymałościowe betonu [2,19], czasu wiązania zawieszin twardniejących [30], natomiast mało znane są parametry wytrzymałościowe samego popiołu.

2. Cel i metodyka pracy

Celem pracy było określenie wpływu zagęszczenia, wilgotności i czasu trwania pielęgnacji na wytrzymałość na ścinanie, wskaźnik nośności CBR oraz wytrzymałość na ściskanie fluidalnego popiołu lotnego ze zsypu Elektrowni „Połaniec”. Badania wykonano w aspekcie oceny ich przydatności do celów budownictwa drogowego.

Podstawowe właściwości fizyczne oraz parametry zagęszczalności oznaczono metodami standardowymi. Skład uziarnienia odpadów oznaczono metodą dyfrakcji laserowej. 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 $1,0 \text{ dm}^3$, przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Wytrzymałość na ścinanie oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach $6\times 6 \text{ cm}$ i wysokości próbki 2 cm . Próbkę zagęszczano w skrzynce aparatu przy wilgotności zbliżonej do optymalnej i trzech wartościach wskaźnika zagęszczenia, tj. $I_s = 0,90, 0,95$ i $1,00$. Konsolidację i ścinanie próbek przeprowadzono przy naprężeniach normalnych o wielkości $50, 100, 200$ i 300 kPa . Prędkość ścięcia wynosiła $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Jako kryterium ścięcia przyjęto maksymalną wartość naprężeń ścinających.

Badania wskaźnika nośności wykonano zgodnie z normą [28] przy trzech wartościach wilgotności wyznaczonych z krzywej zagęszczalności popiołu z badań w aparacie Proctora. Wilgotność wyjściową ($w_{\text{bad}} = 23,7\%$) wyznaczono zgodnie z wyżej wymienioną normą z krzywej zagęszczalności i odpowiadała ona 99% wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu. Wartości dwóch następnych wilgotności przyjęto jako mniejszą (16%) jak i nieco większą (27%) od wilgotności wyjściowej. Wskaźnik zagęszczenia próbek wynosił od $0,98$ do $1,00$.

Wartości wskaźnika nośności określono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasączenia wodą, przy obciążeniu $22,0 \text{ N}$ i penetracji trzpienia o powierzchni 20 cm^2 do głębokości $2,5$ i $5,0 \text{ mm}$ z prędkością $1,25 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Jako wartość miarodajną przyjęto wyższą wartość wskaźnika nośności. W trakcie procesu nasączenia rejestrowano wielkość przyrostu wysokości próbki spowodowanego nasyceciem jej wodą. Pęcznienie liniowe określono, jako stosunek przyrostu

wysokości do początkowej wysokości próbki i wyrażono w procentach. Badania wykonano w co najmniej dwóch powtórzeniach przy każdej wilgotności; do analizy wyników przyjęto wartości średnie odnosząc je do wilgotności uzyskanej w strefie penetracji trzpienia.

Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie fluidalnego popiołu lotnego przeprowadzono na co najmniej 4 próbkach bezpośrednio po ich uformowaniu oraz po 7, 14, 28 i 42 dobowym czasie pielęgnacji przyjmując do analizy wyników wartości średnie. W badaniach zastosowano pielęgnację powietrzną, powietrzno-wodną i powietrzno-wodną z 3, 7 i 14 cyklami zamrażania i odmrażania próbek – łącznie po 7, 14, 28 i 42 dobach pielęgnacji (tab. 1). Próbki o średnicy i wysokości 8 cm formowano w aparacie Proctora przy użyciu standardowej energii zagęszczania ($0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$) i wilgotności zbliżonej do optymalnej. Wskaźnik zagęszczenia tak przygotowanych próbek wynosił od 0,98 do 1,01. Prędkość ściskania próbek wynosiła $6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Tabela 1. Pielęgnacja próbek fluidalnego popiołu lotnego do badań wytrzymałości na ściskanie

Table 1. Curing of samples of fluidized fly ash before the compressive strength test

Wytrzymałość na ściskanie		Przebieg pielęgnacji prób
doby	symbol	
0	R_0	Badanie przeprowadzone bezpośrednio po uformowaniu prób
7	R_7^p	7 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem
	R_7^{p-w}	3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone 1 cm w wodzie, a przez następne 3 doby zanurzone całkowicie w wodzie
	R_7^{z-o}	3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowicie zanurzone w wodzie na 1 dobę, a następnie w ciągu kolejnych 4 dób poddane cykлом ¹⁾ zamrażania i odmrażania

Tabela 1. cd.

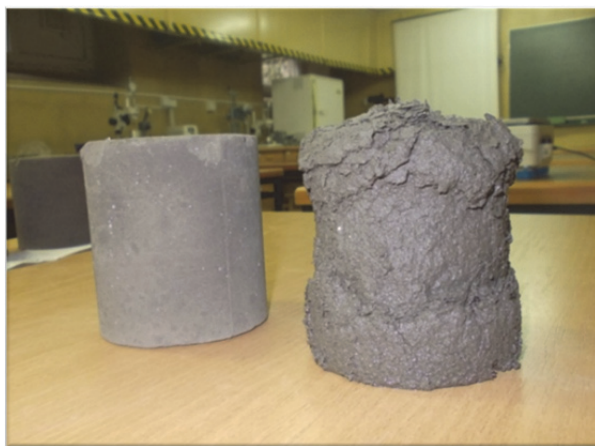
Table 1. continued

Wytrzymałość na ściskanie		Przebieg pielęgnacji prób
doby	symbol	
14	R_{14}^p	14 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem
	R_{14}^{p-w}	6 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone 1 cm w wodzie, a przez następne 7 dób zanurzone całkowicie w wodzie
	R_{14}^{z-o}	6 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowicie zanurzone w wodzie na 1 dobę, a następnie w ciągu kolejnych 7 dób poddane cyklom ¹⁾ zamrażania i odmrażania
28	R_{28}^p	28 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem
	R_{28}^{p-w}	13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone 1 cm w wodzie, a przez następne 14 dób zanurzone całkowicie w wodzie
	R_{28}^{z-o}	13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowicie zanurzone w wodzie na 1 dobę, a następnie w ciągu kolejnych 14 dób poddane cyklom ¹⁾ zamrażania i odmrażania
42	R_{42}^p	42 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem
	R_{42}^{p-w}	27 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone 1 cm w wodzie, a przez następne 14 dób zanurzone całkowicie w wodzie
	R_{42}^{z-o}	27 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowicie zanurzone w wodzie na 1 dobę, a następnie w ciągu kolejnych 14 dób poddane cyklom ¹⁾ zamrażania i odmrażania

¹⁾ jeden cykl to 8 godzinne zamrażanie w temperaturze $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i 16 godzinne odmrażanie w wodzie w temperaturze pokojowej

W celu określenia wpływu pielęgnacji powietrzno-wodnej próbek na wytrzymałość na ściskanie popiołu lotnego obliczono wskaźnik wodopodatności jako stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek po pielęgnacji powietrzno-wodnej do wytrzymałości próbek po analogicznym czasie pielęgnacji powietrznej. Natomiast do oceny odporności na zamrażanie popiołu lotnego oznaczono wskaźnik mrozoodporności obliczony jako stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek po pielęgnacji powietrzno-wodnej z cyklami zamrażania i odmrażania do wytrzymałości próbek po analogicznym czasie pielęgnacji nie poddanych cyklem zamrażania i odmrażania.

Próbki poddane pielęgnacji powietrznej, a więc zabezpieczone przed przesuszeniem nie uległy uszkodzeniom, a ich masa nie uległa zmianie. Również próbki po pielęgnacji powietrzno-wodnej nie wykazywały istotnych zmian masy, stwierdzono jedynie niewielkie rozwarstwiania w górnej ich części i na pobocznicach. Natomiast próbki poddane cyklem zamrażania-odmrażania charakteryzowały się znacznymi ubytkami na swojej pobocznicach (rys. 1), a tym samym zmniejszeniem średnicy i masy. Uszkodzenia te były bardziej widoczne wraz ze zwiększeniem ilości cykli zamrażania i odmrażania.



Rys. 1. Widok próbek poddanych pielęgnacji powietrznej (lewa) i pielęgnacji powietrzno-wodnej z 14 cyklami zamrażania i odmrażania (prawa) (fot. E. Gałowicz)

Fig. 1. View of the samples after air-water maintenance (left) and after 14 cycles of freezing and de-freezing (right) (photo. E. Gałowicz)

W trakcie badania wytrzymałości na ściskanie, w miarę zwiększania obciążenia obserwowano liczne spękania na powierzchniach bocznych próbek, które dość szybko powiększały się aż do ich zniszczenia (rys. 2).

a) przed badaniem



b) w trakcie badania



c) po badaniu



Rys. 2. Widok próbki w trakcie badania wytrzymałości na ściskanie (fot. E. Gałowicz)

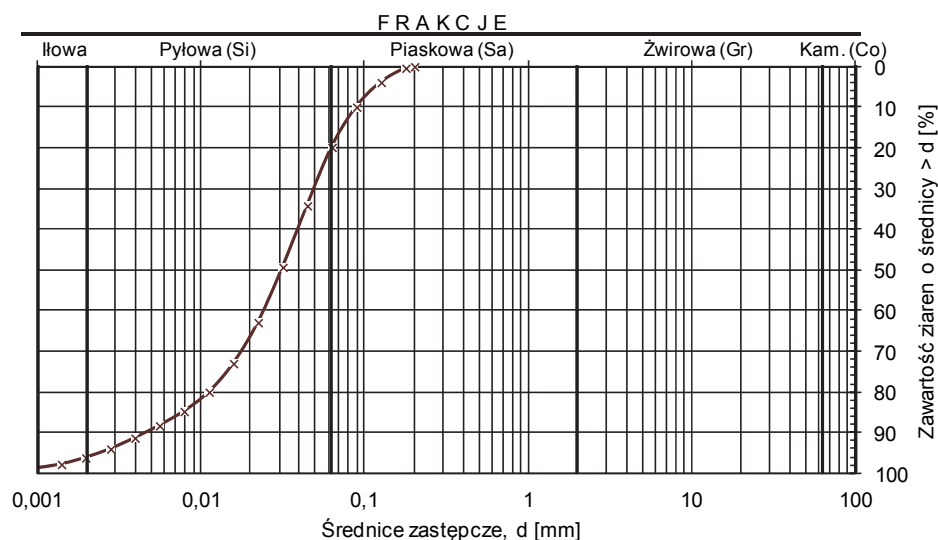
Fig. 2. View of the samples during the compressive strength test (photo. E. Gałowicz)

3. Wyniki badań i ich analiza

Właściwości fizyczne

W składzie uziarnienia popiołu lotnego dominowała frakcja pyłowa, której było 78%, frakcji piaskowej było 19%, a ilowej 3% (rys. 3). Zgodnie z nomenklaturą geotechniczną [27] fluidalny popiół lotny został sklasyfikowany jako kilkufrakcyjny pył piaszczysty (tab. 2).

Gęstość właściwa szkieletu wyniosła $2,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a maksymalna gęstość objętościową szkieletu $1,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ przy wilgotności optymalnej 26%.



Rys. 3. Krzywa uziarnienia fluidalnego popiołu lotnego

Fig. 3. Particle size distribution curve of fluidized fly ash

Tabela 2. Charakterystyka geotechniczna fluidalnego popiołu lotnego

Table 2. Geotechnical properties fluidized fly ash

Parametr	Wartość	
Zawartość frakcji [%]:		
– piaskowa Sa (0,063–2 mm),	19	
– pyłowa Si (0,002–0,063 mm),	78	
– iłowa Cl (<0,002 mm).	3	
Nazwa wg [27]	saSi (pył piaszczysty)	
Zawartość cząstek mniejszych od [%]:	0,075 mm	15
	0,02 mm	34
Wskaźnik jednorodności uziarnienia C_u [-]	8,67	
Wskaźnik krzywizny C_c [-]	1,85	
Gęstość właściwa szkieletu ρ_s [$g \cdot cm^{-3}$]	2,75	
Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	26,0	
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} [$g \cdot cm^{-3}$]	1,42	

Wytrzymałość na ścinanie

Wyniki badań wykazały, że zmiany naprężeń stycznych w trakcie ścinania próbek odpowiadały ścięciu kruchemu. Wartość maksymalną naprężeń stycznych uzyskano w początkowej fazie ścinania w zakresie od około 1 do 3% odkształcenia próbki, a po jej uzyskaniu malały.

Analizując wpływ zagęszczenia stwierdzono, że jego wzrost od $I_s = 0,90$ do $1,00$ spowodował w przypadku kąta tarcia wewnętrznego zwiększenie wartości o $0,6^\circ$, a spójności o ponad 23 kPa [12].

Tabela 3. Parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie fluidalnego popiołu lotnego

Table 3. Shear-strength parameters of the fluidized fly ash

Parametr	Wskaźnik zagęszczenia, I_s [-]		
	0,90	0,95	1,00
Kąt tarcia wewnętrznego, ϕ [$^\circ$]	32,8	33,0	33,3
Spójność, c [kPa]	63,5	67,0	87,0

Wskaźnik nośności CBR

Wskaźnik nośności popiołów lotnych charakteryzował się wartościami zależnymi od wilgotności początkowej, przy której były formowane próbki. Wzrost wilgotności od 17 do 23% spowodował zwiększenie wskaźnika nośności próbek poddanych badaniu bezpośrednio po zagęszczeniu od blisko 19 do 33%. Dalsze zwiększenie wilgotności do około 27% spowodował utratę nośności popiołu – wskaźnik nośności wyniósł zaledwie 2% (tab. 4).

Zastosowany 4-dobowy czas nasączenia wodą spowodował zwiększenie wilgotności. Największe jej zwiększenie (o około 20%) wystąpiło przy najniższej wilgotności początkowej (17%), a najmniejsze (o około 5%) przy największej wilgotności początkowej (27%) (rys. 4a). Zwiększenie wilgotności nie spowodowało jednak zmniejszenia wskaźnika nośności, jak jest to obserwowane w badaniach popiołów lotnych z kotłów konwencjonalnych [13,14]. Uzyskano natomiast znaczne zwiększenie wskaźnika nośności, jego wartości średnie wahały się od 199 do 277% odpowiednio do wzrostu wilgotności, przy której formowano próbki (rys. 4b).

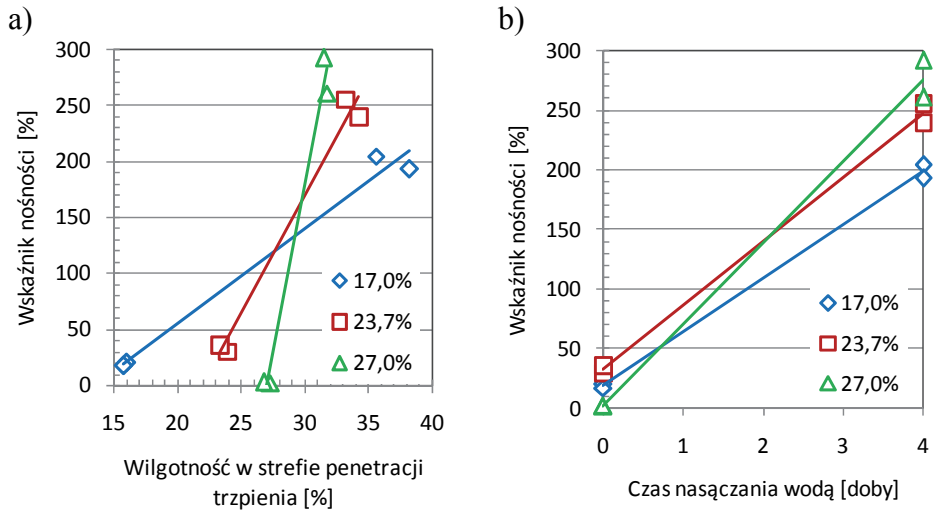
Tabela 4. Zestawienie wartości wskaźnika nośności i wilgotności fluidalnego popiołu lotnego

Table 4. Value of the CBR ratio and moisture content of the fluidized fly-ash

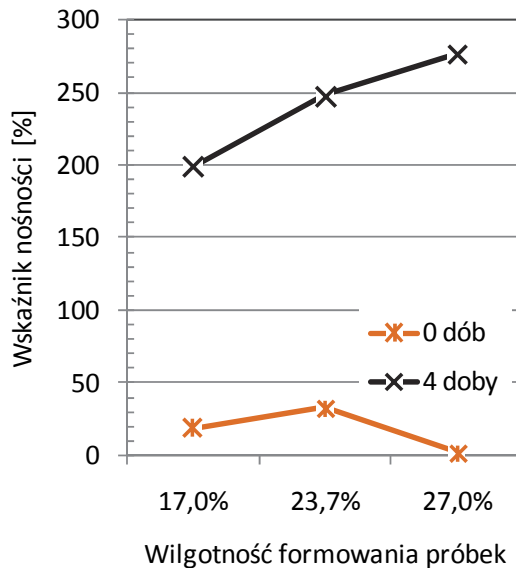
Wilgotność założona	Czas nasączenia wodą	Wilgotność w strefie penetracji trzpienia		Wskaźnik nośności	
		próbki	średnia	próbki	średnia
[%]	[doby]	[%]		[%]	
17,0	0	17,02	17,0	20,3	18,7
		17,06		17,7	
	4	35,56	36,9	204,4	198,8
		38,32		193,3	
23,7	0	23,91	23,6	29,9	33,1
		23,33		36,3	
	4	34,19	31,2	239,8	247,7
		28,15		255,5	
27,0	0	27,29	27,0	2,0	2,1
		26,78		2,2	
	4	31,46	31,6	291,9	276,7
		31,75		260,6	

Uzyskane wyniki wskazują, że im większa była wilgotność, przy której formowano próbki do badań wskaźnika nośności tym wyższe uzyskano jego wartości po 4-dobowym czasie ich nasączenia (rys. 5). Jest to związane ze znaczną zawartością produktów odsiarczania co sprawia, że po zarobieniu z wodą ujawniają się własności wiążące popiołu.

Popioły fluidalne charakteryzują się dużą zawartością zdehydratyzowanych minerałów ilastych (głównie kaolinit) o bardzo wysokiej aktywności pucolanowej [34]. W składzie fazowym fluidalnych popiołów lotnych występuje również anhydryt II, stanowiący w technologii cementu wysoko ceniony dodatek do regulacji czasu wiązania cementu. Badania wielu autorów [20,21] wykazały, że aktywność pucolanowa popiołów fluidalnych jest nawet dwukrotnie większa niż popiołów krzemianowych.



Rys. 4. Zależność wskaźnika nośności CBR od wilgotności (a) i czasu nasączenia wodą (b) dla próbek o różnej wilgotności początkowej
Fig. 4. Influence of moisture content (a) and the time of soaking water (b) on the CBR ratio for samples of different initial moisture content



Rys. 5. Zależność wskaźnika nośności CBR od wilgotności początkowej próbek
Fig. 5. Influence of initial moisture content on the CBR ratio

Pęcznienie liniowe

W przeprowadzonych badaniach pęcznienie liniowe popiołu było nieznaczne i wynosiło od 0,1 do 0,3%. Największe jego wartości uzyskano dla próbek formowanych przy najniższej wilgotności, a najmniejsze przy wilgotności powyżej optymalnej.

Wytrzymałość na ściskanie

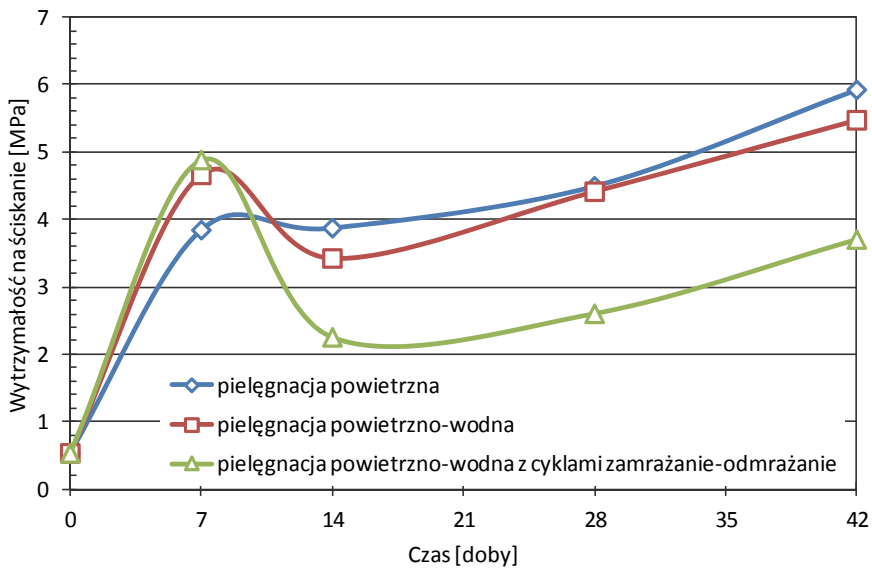
Próbki poddane badaniu bezpośrednio po ich uformowaniu wykazały najniższą wartość wytrzymałości na ściskanie wynoszącą 0,53 MPa. Zastosowanie czasu pielęgnacji od 7 do 42 dób spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie (tab. 5).

Tabela 5. Wytrzymałość na ściskanie i wilgotność próbek fluidalnego popiołu lotnego dla przyjętego czasu i rodzaju pielęgnacji

Table 5. The compressive strength and moisture content of fluidized fly ash for a given time and type of curing

Czas pielęgnacji	Wytrzymałość na ściskanie			Wilgotność po badaniu	
	symbol	zakres	średnia	zakres	średnia
do		MPa		%	
0	R_0	0,50–0,55	0,53	23,7–24,3	23,9
7	R_7^P	3,70–4,01	3,84	23,3–24,1	23,6
	R_7^{P-W}	4,41–4,91	4,66	28,2–29,0	28,6
	R_7^{Z-O}	4,45–5,39	4,88	28,2–29,0	28,6
14	R_{14}^P	3,63–3,99	3,87	22,2–23,2	22,8
	R_{14}^{P-W}	3,00–3,68	3,42	27,3–30,9	29,5
	R_{14}^{Z-O}	1,81–2,68	2,25	29,4–32,9	31,2
28	R_{28}^P	4,17–4,72	4,49	22,0–22,3	22,1
	R_{28}^{P-W}	4,27–4,49	4,41	29,8–32,8	31,4
	R_{28}^{Z-O}	2,52–2,65	2,60	37,5–39,2	38,4
42	R_{42}^P	5,89–5,94	5,92	21,5–22,0	21,7
	R_{42}^{P-W}	5,44–5,49	5,47	30,0–31,3	30,7
	R_{42}^{Z-O}	3,65–3,76	3,70	32,0–35,3	34,1

Największe zwiększenie wytrzymałości uzyskano po 7 dobach pielęgnacji – przy powietrznej ponad 7-krotnie, a przy powietrzno-wodnej (również z cyklami zamrażanie-odmrażanie) – 9-krotnie (rys. 6). Wzrost czasu pielęgnacji do 14 dób nie spowodował przy pielęgnacji powietrznej żadnych zmian wytrzymałości na ściskanie w stosunku do 7-dobowej pielęgnacji, a w przypadku pielęgnacji powietrzno-wodnej 30% zmniejszenie oraz 50% również zmniejszenie przy pielęgnacji powietrzno-wodnej z cyklami zamrażanie-odmrażanie. Dalsze wydłużenie czasu pielęgnacji do 28 dób spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie średnio ponad 30% dla wszystkich typów pielęgnacji, a przy 42-dobowym czasie pielęgnacji o dodatkowe 30%.



Rys. 6. Zależność wytrzymałości na ściskanie od długości i rodzaju pielęgnacji próbek

Fig. 6. The influence of time and type of curing on the compression strength

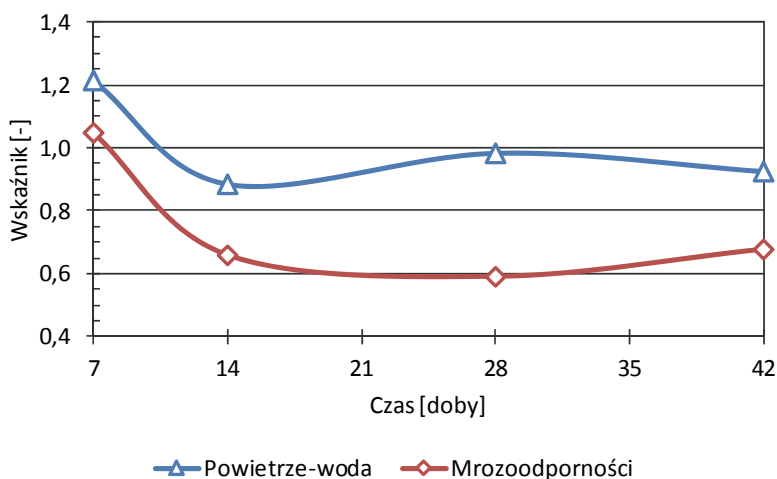
Jak wykazano powyżej wytrzymałość na ściskanie badanego fluidalnego popiołu lotnego zależała od czasu trwania i rodzaju pielęgnacji próbek. Największe wartości i najwyższy przyrost wytrzymałości, bo od 0,53 do 5,92 MPa uzyskano dla próbek poddanych pielęgnacji powietrznej, podobny przyrost wytrzymałości uzyskano przy pielęgnacji powietrzno-wodnej – od 0,53 do 5,47 MPa.

Natomiast najniższy przyrost wytrzymałości na ściskanie wystąpił dla próbek poddanych pielęgnacji powietrzno-wodnej z cyklami zamrażania i odmrażania – od 0,53 do 3,70 MPa. W tym przypadku wartość maksymalną wytrzymałości uzyskano po 7 dobowym czasie pielęgnacji – 4,88 MPa i była to najwyższa wartość wytrzymałości dla zastosowanych rodzajów pielęgnacji.

Wskaźnik wodopodatności i mrozoodporności

Wartości wskaźnika wodopodatności wskazują, że w przypadku 7 dobowego czasu pielęgnacji dominującą rolę odgrywa pielęgnacja powietrzno-wodna, wskaźnik znacznie powyżej 1,0 (tab. 6, rys. 7). Natomiast po 14, 28 i 42 dobowym czasie pielęgnacji uzyskano wartości wskaźnika poniżej 1,0 co świadczy o wpływie pielęgnacji wodnej na obniżenie wytrzymałości na ściskanie.

Wskaźnik mrozoodporności po 3 cyklach zamrażania i odmrażania (7 dobach pielęgnacji) charakteryzował się wartością powyżej 1,0, a więc można stwierdzić, że badany popiół nie był wrażliwy na krótki cykl zamrażania i odmrażania. Zwiększenie liczby cykli do 7 i 14 (14, 28 i 42 doby pielęgnacji) spowodowało, że wartości wskaźnika były znacznie poniżej 1,0 co świadczy o znacznej utracie wytrzymałości na ściskanie (od 32 do 41%) na skutek wydłużenia liczby cykli zamrażania i odmrażania, a więc podatności na ujemne temperatury.



Rys. 7. Wpływ czasu pielęgnacji na wskaźnik wodopodatności i mrozoodporności
Fig. 7. The influence of curing time on water and frost resistance indexes

Tabela 6. Zestawienie obliczeń wskaźnika wodopodatkności i mrozoodporności
Table 6. Calculations of water and frost resistance indexes

Czas pielęgnacji	Wytrzymałość na ściskanie		Wskaźnik powietrze-woda	Wytrzymałość na ściskanie		Wskaźnik mrozo-odporności
	Doby	- MPa		-	- MPa	
7	R_7^p	3,84	1,21	R_7^{p-w}	4,66	1,05
	R_7^{p-w}	4,66		R_7^{z-o}	4,88	
14	R_{14}^p	3,87	0,88	R_{14}^{p-w}	3,42	0,66
	R_{14}^{p-w}	3,42		R_{14}^{z-o}	2,25	
28	R_{28}^p	4,49	0,98	R_{28}^{p-w}	4,49	0,59
	R_{28}^{p-w}	4,41		R_{28}^{z-o}	2,60	
42	R_{42}^p	5,92	0,92	R_{42}^{p-w}	5,47	0,68
	R_{42}^{p-w}	5,47		R_{42}^{z-o}	3,70	

4. Podsumowanie

Wyniki badań fluidalnego popiołu lotnego z Elektrowni „Połaniec” wykazały, że zostały spełnione w większości wymagania normy [28] w aspekcie stosowania odpadów ponegertycznych w drogownictwie. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu popiołu ($1,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) była większa od wymaganej ($\geq 1,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), a także wartości wskaźnika nośności po nawodnieniu, znacznie powyżej 200%, spełniają wymogi normy ($\geq 10\%$). Badania wytrzymałości na ścinanie przedmiotowego popiołu lotnego [12] wskazują, że wartości kąta tarcia wewnętrznego są powyżej 30° , a więc spełnione są również wymagania powyżej cytowanej normy odnośnie wartości tego parametru ($\geq 20^\circ$). Jedynie pod względem uziarnienia badany popiół lotny nie spełnia wymagań normy [28] ponieważ zawartość frakcji piaskowo-żwirowej była blisko dwukrotnie poniżej wymaganych 35%. Należy jednak zaznaczyć, że zawartość frakcji mniejszej od 0,075 mm wynosząca 15% spełnia wymagania powyższej normy ($\leq 75\%$).

Biorąc pod uwagę wiązania puculanowe zachodzące w badanym popiele lotnym, celowym może być jego zastosowanie do tworzenia mieszanek stosowanych do podbudów z betonu popiołowego. Odnosząc uży-

skane wartości wytrzymałości na ściskanie do wymagań normy [29] można stwierdzić, że są one generalnie spełnione dla każdej warstwy nawierzchni drogowej. Wymagania normy stanowią, że wartość wytrzymałości na ściskanie po 14 i 42 dobach pielęgnacji powietrzno-wodnej przy stosowaniu betonów popiołowych na górne warstwy podbudowy powinna wynosić dla ruchu ciężkiego i bardzo ciężkiego odpowiednio powyżej 2,5 MPa oraz od 5 do 8 MPa. W prowadzonych badaniach uzyskano blisko 4 MPa wytrzymałości na ściskanie po 14 dobach pielęgnacji oraz blisko 5,5 MPa po 42 dobach pielęgnacji. Jedynie uzyskana wytrzymałość po 14 cyklach zamrażania i odmrażania wynosząca 3,7 MPa jest poniżej wymaganej wartości (≥ 4 MPa). Natomiast wymagania w przypadku górnych i dolnych warstw podbudowy dla ruchu lekkiego i średniego zostały spełnione ze znacznym zapasem.

Dlatego badane fluidalne popioły lotne można uznać, jako przydatne do celów budownictwa drogowego pod warunkiem stałej kontroli ich właściwości geotechnicznych i chemicznych. Mogą one spełniać rolę samodzielnych spoiw hydraulicznych lub dodatków do cementów redukując w ten sposób koszty związane ze stabilizacją gruntów.

Literatura

1. **Bastian S.:** *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*. Arkady, Warszawa 1980.
2. **Brzozowski P.:** *Możliwości wykorzystania popiołów lotnych ze spalania w kotłach fluidalnych do betonów układanych pod wodą*. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2, 5–11 (2011).
3. **Dąbrowski J., Dąbrowski T., Piecuch T.:** *Laboratoryjne badania nad skutecznością odsiarczania spalin metodą wapniową*. Ekonomia i Środowisko. 4(47), 137–145 (2013).
4. **Dulewski J.:** *Ustawa o odpadach a wykorzystanie przemysłowe odpadów w górnictwie podziemnym*. Materiały IV konferencji „Problemy zagospodarowania odpadów mineralnych”. KGHM Polska Miedź SA, Lublin, Agencja Budowy i Eksploatacji Autostrad, Warszawa, Agencja Gospodarki Odpadami „AGOS” S.A., Katowice, Wisła. 125–130 (1998).
5. **Filipiak J.:** *Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 13, 1043–1054 (2011).

6. **Filipiak J.:** *Wykorzystanie ubocznych produktów spalania jako stabilizatora do wzmacniania gruntów organicznych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 1153–1163 (2013).
7. **Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.:** *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce.* Gospodarka Surowcami Mineralnymi. 1, 23–42 (2005).
8. **Gawlicki M., Wons W.:** *Właściwości fizykochemiczne popiołów lotnych z kotłów fluidalnych i ich wpływ na wybrane cechy użytkowe mieszanek drogowych.* Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. 12, 18–27 (2013).
9. **Gawlicki M., Wons W.:** *Popioły lotne z kotłów fluidalnych jako składniki popiołowo-cementowych spoiw drogowych.* Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. 8, 69–78 (2012).
10. **Giergiczny Z.:** *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemiankowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych.* Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia nr 325, Kraków 2006.
11. **Glinicki M., Ładyżyński K.:** *Aktywowany popiół lotny z kotłów o spalaniu fluidalnym – nowy dodatek do betonów.* Materiały XVIII Konferencja Naukowo-Technicznej „Beton i prefabrykacja”. 1, 120–127 (2002).
12. **Gruchot A., Marcinów K.:** *Wytrzymałość na ścinanie fluidalnych popiołów lotnych poddanych pielęgnacji powietrznej i wodnej.* Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, maszynopis, 2014.
13. **Gruchot A.T.:** *Charakterystyka geotechniczna wybranych odpadów poenergetycznych w aspekcie wykorzystania ich do budownictwa drogowego.* Materiały XV Krajowej Konferencja Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej „Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych”. Wydawnictwo Uczelniane UTP, Bydgoszcz. 253–258 (2009).
14. **Gruchot A., Zawisza Z., Aksamit M.:** *Wpływ wilgotności na wartości wskaźnika nośności wybranych odpadów przemysłowych.* Przegląd Górniczy. 11/12, 138–142 (2009).
15. **Iwanek P., Jelonek I., Mirkowski Z.:** *Wstępne badania popiołów z kotła fluidalnego w aspekcie ich zagospodarowania.* Gospodarka Surowcami Mineralnymi. 24(4/4), 91–104 (2008).
16. **Jarema-Suchorowska S., Kuczok B.:** *Właściwości popiołów z kotłów fluidalnych w energetyce w aspekcie warunków gospodarczego wykorzystania tych odpadów.* Energetyka, Biuletyn Naukowo-Techniczny Energo-pomiaru. 1(235), 2010.

17. **Kabała J., Brzozowski B., Listkiewicz J.:** *Zastosowanie spoiwa STABILIZER wytworzonego na bazie produktów spalania węgla odsiarczania spalin z kotłów fluidalnych EL. Turów S.A. do stabilizacji gruntów i budowy nasypów w budownictwie drogowym.* ELTUR-WAPORE Sp. z o.o., Bogatynia 2003.
18. **Kraszewski C., Pachowski J.:** *Popioły w drogownictwie – wymagania i zastosowanie.* Materiały Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”. Licheń Stary k. Konina. 13–22 (2003).
19. **Kubissa W., Wilińska I., Pałuba M.:** *Badania właściwości betonów cementowych wykonanych z udziałem odpadów przemysłowych.* Konstrukcje – Elementy – Materiały. 1, 35–39 (2013).
20. **Łaskawiec K., Gębarowski P., Zapotoczna-Sytek G., Małolepszy J.:** *Zastosowanie popiołów ze spalania węgla kamiennego w kottach fluidalnych do produkcji betonów komórkowych.* Cement, wapno, beton. 1, 14–23 (2012).
21. **Małolepszy J.:** *Wykorzystanie ubocznych produktów spalania węgla w kottach fluidalnych do produkcji materiałów budowlanych.* Materiały VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe inżynierii lądowej”, MATBUD 2011, Kraków 2011.
22. *Mały Rocznik Statystyczny Polski.* Główny Urząd Statystyczny. Zakład Wydawnictw Statystycznych. Warszawa 2014.
23. **Nowak W., Majchrzak-Kuceba I., Majchrzak A.:** *Nowe kierunki zagospodarowania popiołów lotnych.* Materiały XVIII Konferencji „Popioły z energetyki”, Zakopane. 37–54 (2011).
24. **Pachowski J., Wileński P.:** *Badania przydatności kruszywa ze złoża kotła fluidalnego spalania węgla kamiennego w EC Żerań dla celów drogowych.* IBDiM, Kielce. 2000.
25. **Piecuch T., Dąbrowski T., Hryniewicz T., Żuchowicki W.:** *Polish-Made Pyrolytic Convective Waste Utilizer of WPS Type. Structure, Principle of Operation and Evaluation. Problems of Residue Management After Thermal Waste Utilization.* The Journal of Solid Waste Technology and Management. 26(3&4), 168–186 (1999).
26. **Piecuch T., Dąbrowski J.:** *Projekt koncepcyjny budowy Zakładu Termicznej Utylizacji Odpadów dla Gminy Polczyn-Zdrój.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 16, 196–222 (2014).
27. PN-EN ISO 14688-2:2006. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.* Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
28. PN-S-02205:1998. *Drogi samochodowe. Roboty zimne. Wymagania i badania.* Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

29. PN-S-06103:1997. *Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
30. **Pomykała R., Kępyś W., Łyko P.:** *Wpływ temperatury oraz dodatku cementu na czas wiązania zawiesin popiołowo-wodnych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 1818–1833 (2013).
31. **Pyssa J.:** *Odpady z energetyki – przemysłowe zagospodarowanie odpadów z kotłów fluidalnych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. 21(3), 83–92 (2005).
32. **Rosik-Dulewska C.:** *Podstawy gospodarki odpadami*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
33. **Szydło A.:** *Wykorzystanie mieszanin popiołowo-żużlowych z Elektrociepłowni Wrocław w budownictwie drogowym*. Materiały. Seminarium Technicznego „Popioły w drogownictwie”. Licheń Stary k. Konina. 93–101 (2003).
34. **Zapotoczna-Sytek G., Łaskawiec K., Gębarowski P., Małolepszy J., Szymczak J.:** *Popioły lotne nowej generacji do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego*. Monografia. Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Warszawa 2013.

Mechanical Properties of Fluidized Fly Ash from Power Station “Połaniec”

Abstract

Production of electricity and heat energy in Poland is largely based on the combustion of coal and lignite in power plants. Combustion of coal is associated with the production of significant quantities of wastes. Given the possibilities of their using, the most important product of combustion is fly ash and recently – fluidized fly ash. Tests on properties of fluidized fly ash are mainly focused on determining the impact of its addition on the mechanical properties of concrete or the setting time of self-hardening slurries, while little is known about its mechanical parameters.

The aim of the study was to determine the impact of density, moisture content and maintenance duration on shear strength, CBR ratio and compressive strength of fluidized fly ash from Power Plant "Połaniec". The study was performed in terms of assessing their possibility of use for the purpose of road construction. CBR ratio was determined at three various values of moisture content determined from compaction curve of the fly-ash. CBR ratio tests were done for samples directly after compaction and after 4 days of the soaking in water. Shear strength was determined in a direct shear apparatus on samples compact-

ed at a moisture content close to the optimum and three values of the compaction index $IS = 0.90, 0.95$ and 1.00 . Determination of compressive strength was carried out on samples immediately after preparation and after 7, 14, 28 and 42 days of air, air-water and air-water maintenance process including 3, 7, and 14 cycles of freezing and de-freezing.

The results revealed that in accordance with the geotechnical nomenclature the tested fluidized fly-ash's grain-size distribution corresponds to sandy silts. The fly-ash has high value of maximum dry density. CBR ratio of fly-ash samples after 4 days of soaking in water were very high and ranged from 199 to 277%. It can be underline that in case of both tests series, the obtained CBR indexes were positively correlated with increasing initial moisture content of tested samples. The parameters of the shear strength were high. It was stated that the higher values of compaction indexes, the higher values of the angle of internal friction and cohesion were obtained. The compressive strength of samples was high, ranging from over 2.2 MPa to approximately 6.0 MPa. The largest increase in strength was obtained after 7 days of maintenance. The maximum values of compressive strength after 42 days of maintenance, were obtained for samples which were subjected to air and air-water maintenance process. Freeze-thaw resistance index value obtained for a short 3 cycles of freezing and de-freezing process was greater than 1.0, which means that tested fly-ash was not prone to freezing process. Increasing number of freezing and de-freezing cycles affected the freeze-thaw resistance index value, which was well below 1.0, indicating a significant loss of compressive strength.

To sum up, the test results on the fluidized fly ash from Power Plant "Połaniec" revealed that the fly-ash has good compaction properties, bearing capacity and shear strength. In contrast, the particle size of the fly-ash is unfavorable from the viewpoint of its use in road embankments. In turn, the results of the CBR and compressive strength tests confirmed the presence of hydration properties of fluidized fly ash thus indicating the possibility of its use in road hydraulic binders.

Słowa kluczowe:

fluidalny popiół lotny, wytrzymałość na ścinanie, wskaźnik nośności CBR, wytrzymałość na ściskanie, budownictwo drogowe

Keywords:

fluidized fly ash, shear strength, CBR ratio, compressive strength, road construction