

Geotechniczna analiza przydatności mieszanki popiołowo-żużlowej w budownictwie drogowym



Dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza, prof. UR, dr hab. inż. Andrzej Gruchot, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

1. Wprowadzenie

Uboczne produkty spalania (UPS) węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach stanowią znaczną grupę odpadów przemysłowych. Przemysł energetyczny wytwarza rocznie około 18 mln ton tych odpadów, co stanowi około 14,5% w ogólnej ilości odpadów przemysłowych wytwarzanych w Polsce [8]. Część odpadów kierowana jest na składowiska, szacuje się, że pozostaje tam około 294,1 mln ton odpadów. Natomiast pozostała część znajduje zastosowanie w różnych sektorach gospodarki [5, 14].

W przypadku drobnych odpadów energetycznych, jakimi są między innymi popioły lotne, stosuje się je głównie do produkcji cementu i materiałów budowlanych, a w ograniczonym zakresie do celów rolniczych. Odpady grubsze, np. mieszanki popiołowo-żużlowe, są wykorzystywane do celów budownictwa drogowego, a także rekultywacji terenu i wypełnień wyrobisk podziemnych [1, 3, 6, 15].

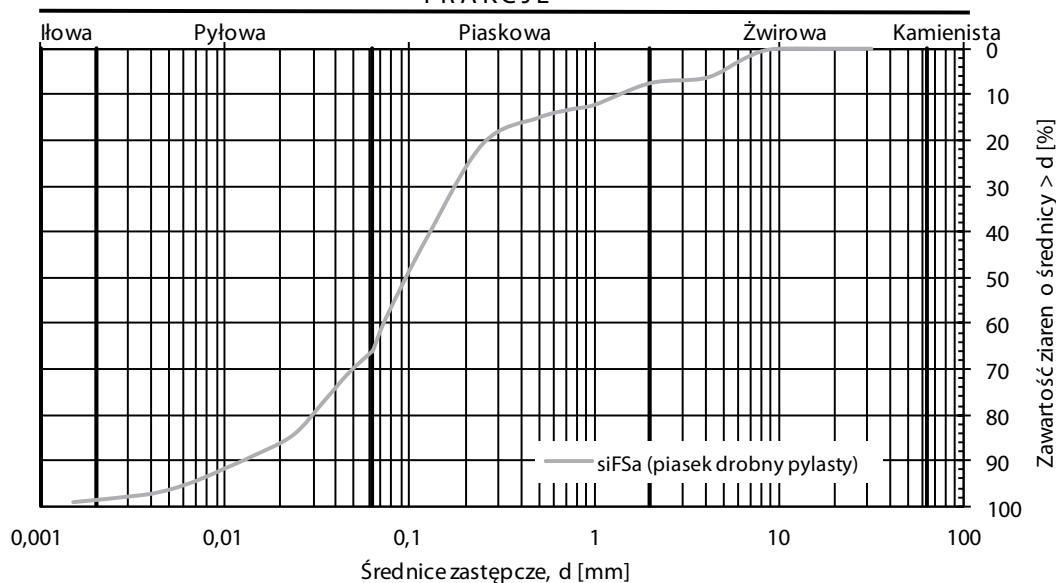
Czynnikiem decydującym o jakości ubocznych produktów spalania jest rodzaj spalanej paliwy, a głównie zawartość w nim składników popiołotwórczych. Wzrastające zapotrzebowanie

na energię elektryczną spowodowało zwiększenie zapotrzebowania na wszelkiego rodzaju materiały energooszczędne, co powoduje znaczną zmienność właściwości chemicznych i geotechnicznych odpadów poenergetycznych [2, 4].

2. Cel i metody badań

Przedmiotem badań była mieszanka popiołowo-żużłowa pochodząca ze składowiska Elektrociepłowni „Kraków” EDF. Celem badań było określenie charakterystyki geotechnicznej mieszanki oraz ocena jej przydatności do budowy nasypów ziemnych, w szczególności drogowych. Badania przeprowadzono w Laboratorium Geotechnicznym Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie na próbie uśrednionej z materiału pobranego z dwóch części składowiska. Zakres badań obejmował oznaczenie właściwości fizycznych, to jest skład uziarnienia, wilgotności naturalnej, gęstości właściwej szkieletu, wilgotności optymalnej, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz właściwości mechanicznych, to jest parametrów wytrzymałości na ścinanie.

FRAKCJE



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki popiołowo-żużlowej

Podstawowe właściwości fizyczne mieszaniny popiołowo-żużlowej oznaczono metodami standardowymi [7, 9, 13]. Skład uziarnienia oznaczono metodą łączoną, to jest sitową i areometryczną. Analizę sitową z przemywaniem wodą stosowano dla frakcji większych od 0,063 mm, natomiast analizę areometryczną dla frakcji mniejszych od 0,063 mm. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono dla cząstek mniejszych od 0,063 mm metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej. Wilgotność naturalną oznaczono metodą suszarkową w temperaturze 105°C.

Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora, w cylindrze o objętości 1 dm³ (h = 10 cm, d = 11,2 cm), stosując standardową energię zagęszczenia $E_z = 0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Wskaźnik nośności oznaczono w cylindrze o objętości 2,2 dm³ (h = 17,5 cm, d = 15 cm), zgodnie z [12], przy penetracji próbki trzpieniem o powierzchni 20 cm² do głębokości 2,5 i 5 cm. Większą z uzyskanych wartości przyjęto jako miarodajną wartość wskaźnika nośności. Próbki do badań wskaźnika nośności formowano przy wilgotności odpowiadającej 99% maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu wyznaczonej z krzywej Proctora przy energii zagęszczenia $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$. Próbki poddano nasączeniu w wodzie przez 4 doby, przy obciążeniu siłą 22 oraz 44 N. W czasie nasączenia wodą rejestrowano przyrost wysokości próbek. Wartość pęcznienia liniowego określono jako stosunek przyrostu wysokości próbki do jej początkowej wysokości i wyrażono w procentach.

Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie, to jest kąta tarcia wewnętrznego i spójności, oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynkach o wymiarach w przekroju 10×10 i 12×12 cm, z ramkami pośrednimi tworzącymi strefę ścinania o grubości 1,0 cm. Stosowanie ramek pośrednich umożliwia ścinanie strefowe, ograniczające wpływ ząbienia i klinowania się ziaren na wartość spójności (tzw. spójność pozorną). Próbki formowano bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,97$, następnie konsolidowano przy obciążeniu pionowym o wielkości 50, 100, 200, 300 i 400 kPa przez 30 minut i ścinano przy prędkości $0,25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

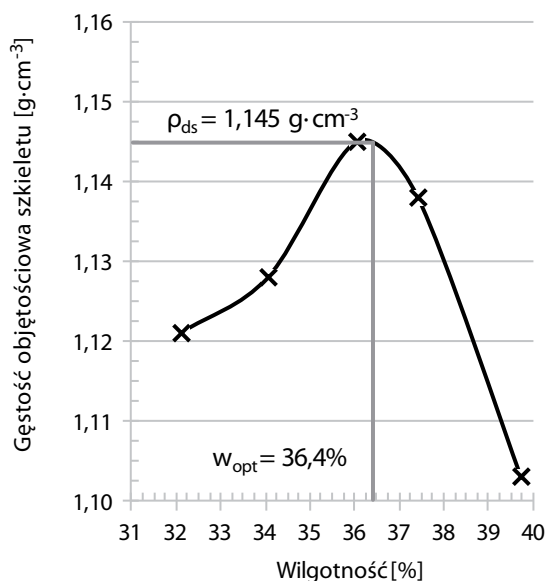
3. Wyniki badań

Według nomenklatury geotechnicznej [11] mieszanina popiołowo-żużłowa odpowiadała kilkufrakcyjnym piaskom drobnym pylastym (rys. 1). W składzie uziarnienia największy udział miała frakcja piaskowa – około 59%, mniejszy – pyłowa 32%, a najmniejszy ilowa – około 2%. Wskaźnik różnoziarnistości wynosił około 11. Gęstość właściwa szkieletu wynosiła $2,42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (tab. 1).

Wilgotność naturalna była zróżnicowana i wynosiła od 16,9 do 24,4%, co wynikało z różnej lokalizacji punktów poboru próbek w różnych terminach oraz warunków atmosferycznych.

Tabela 1. Podstawowe właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żużlowej

Parametr	Wartość
Gęstość właściwa szkieletu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	2,42
Wilgotność naturalna [%]	16,9–24,4
Wilgotność optymalna [%]	36,4
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	1,145
Kąt tarcia wewnętrznego [°] przy $I_s = 0,97$	36,0
Spójność [kPa] przy $I_s = 0,97$	44,6
Wskaźnik nośności [%]:	
• bezpośrednio po uformowaniu próbki przy obciążeniu siłą:	
– 22 N	36,3
– 44 N	35,9
• po 4-dobowym nasączeniu wodą przy obciążeniu siłą:	
– 22 N	20,4
– 44 N	25,9
Pęcznienie liniowe [%] po 4-dobowym nasączeniu wodą przy obciążeniu siłą:	
– 22 N	0,53
– 44 N	0,10

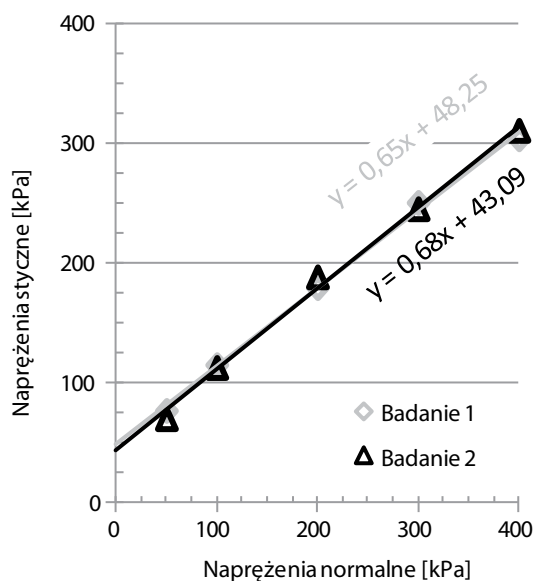


Rys. 2. Zależność gęstości objętościowej szkieletu od wilgotności

Wilgotność optymalna wynosiła 36,4%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu $1,15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (rys. 2).

Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie, przy zagęszczeniu o $I_s = 0,97$ wynosiły: kąt tarcia wewnętrznego – 34°, a spójność – 44,6 kPa. Wartości te są stosunkowo duże i świadczą o znacznej wytrzymałości na ścinanie badanej mieszaniny.

Wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po uformowaniu próbek wynosił ponad 36% przy obciążeniu siłą 22 i 44 N. Po czterech dobach nasączenia wodą zmniejszył się do wartości nieco ponad 20% przy obciążeniu 22 N i do około 26% przy obciążeniu 44 N (rys. 4a). Było to spowodowane zwiększeniem wilgotności mieszaniny w strefie penetracji



Rys. 3. Zależność naprężeń stycznych od normalnych

trzczenia o 9% (od wilgotności początkowej wynoszącej 32% do 24%), była wyraźnie mniejsza od wilgotności optymalnej (ponad 36%). Dlatego należy przewidzieć dodatkowe zabiegi polegające na dowilgoceniu materiału, zwłaszcza w okresach suchych, w celu doprowadzenia do wilgotności zbliżonej do optymalnej dla zapewnienia dobrych efektów zagęszczania. Mieszanina ma wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu ($\rho_{ds} = 1,15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) większą od minimalnej wymaganej ($\rho_{ds} = 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Wartość kąta tarcia wewnętrznego ($\phi = 34^\circ$) jest znacznie większa od minimalnej wymaganej ($\phi = 20^\circ$) i świadczy o dużej wytrzymałości na ścinanie, co pozwala prognozować dobrą stateczność skarp nasypów z tego materiału. Wskaźnik nośności po czterech dobach nasączenia wodą przy obciążeniu siłą 22 N ($w_{nos} = 20,3\%$) jest znacznie większy od minimalnego wymaganego ($w_{nos} = 10\%$), co pozwala prognozować odpowiednią nośność nasypu z tego materiału. Pęcznienie liniowe przy obciążeniu siłą 22 N ($p = 0,53\%$) jest nieco większe od dopuszczalnego ($p \leq 0,5\%$), przy czym

4. Ocena przydatności mieszaniny popiołowo-żużlowej do budowy nasypów drogowych

Wymagania, jakie powinny spełniać naturalne grunty mineralne oraz mieszaniny popiołowo-żużłowe stosowane do wykonania ziemnych nasypów drogowych, określone zostały w normie [12]. Dotyczą one zarówno uziarnienia, jak i parametrów charakteryzujących wysadzinowość, zageszczalność, zawartość części organicznych, nośność, pęcznienie liniowe, kąt tarcia wewnętrznego. Pod względem uziarnienia badana

mieszanina odpowiada piaskom drobnym pylistym. Wyżej cytowana norma określa takie mieszaniny jako przydatne do stosowania na dolne warstwy nasypu poniżej strefy przemarzania, pod warunkiem wbudowania w miejsce suche lub izolowane od wody. Norma dopuszcza takie materiały również na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania pod warunkiem ulepszenia ich spoiwami, np. cementem, wapnem lub aktywnymi popiołami. Wartości poszczególnych parametrów geotechnicznych badanej mieszaniny z odnośnymi wymaganiami normowymi zestawiono w tabeli 2.

Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że mieszanina popiołowo-żużłowa stanowi antropogeniczny grunt gruboziarnisty na pograniczu drobnoziarnistego [10]. Wartość wskaźnika różnoziarności ($C_u = 10,6$) wskazuje, że jest to materiał kilkufrakcyjny, można więc przewidywać jego średnią, a nawet dobrą zagęszczalność w trakcie wbudowywania w nasyp przy zachowaniu odpowiedniej wilgotności. Wilgotność naturalna, zmienna w różnych partiach materiału (w przypadku przeprowadzonych badań od około 17 do 24%), była wyraźnie mniejsza od wilgotności optymalnej (ponad 36%). Dlatego należy przewidzieć dodatkowe zabiegi polegające na dowilgoceniu materiału, zwłaszcza w okresach suchych, w celu doprowadzenia do wilgotności zbliżonej do optymalnej dla zapewnienia dobrych efektów zagęszczania. Mieszanina ma wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu ($\rho_{ds} = 1,15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) większą od minimalnej wymaganej ($\rho_{ds} = 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Wartość kąta tarcia wewnętrznego ($\phi = 34^\circ$) jest znacznie większa od minimalnej wymaganej ($\phi = 20^\circ$) i świadczy o dużej wytrzymałości na ścinanie, co pozwala prognozować dobrą stateczność skarp nasypów z tego materiału. Wskaźnik nośności po czterech dobach nasączenia wodą przy obciążeniu siłą 22 N ($w_{nos} = 20,3\%$) jest znacznie większy od minimalnego wymaganego ($w_{nos} = 10\%$), co pozwala prognozować odpowiednią nośność nasypu z tego materiału.

Pęcznienie liniowe przy obciążeniu siłą 22 N ($p = 0,53\%$) jest nieco większe od dopuszczalnego ($p \leq 0,5\%$), przy czym

Rys. 4. Wpływ wilgotności (a) i obciążenia (b) na wskaźnik nośności

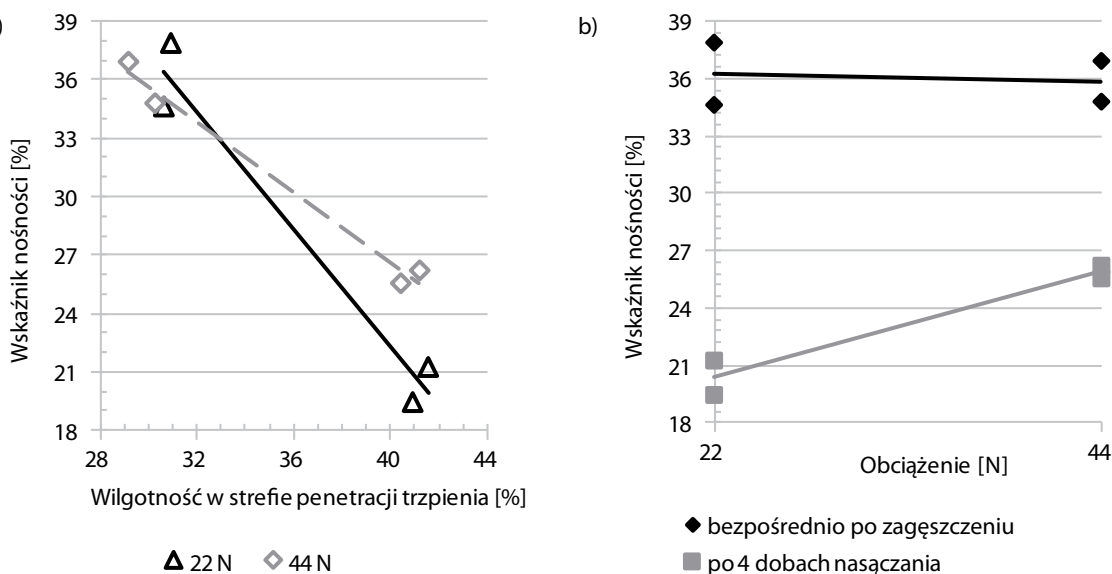
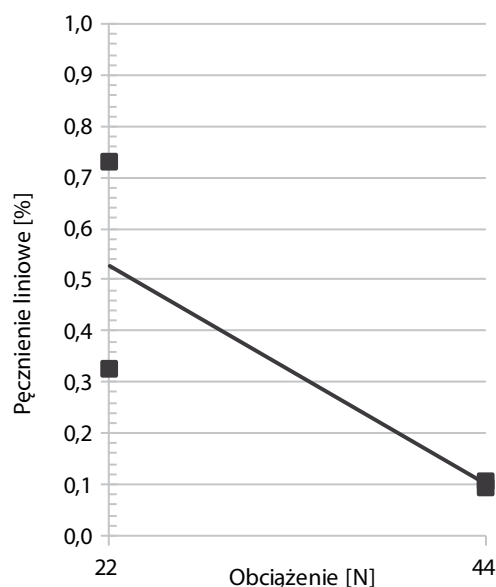


Tabela 2. Wartości parametrów geotechnicznych mieszanki popiołowo-żużlowej na tle wymagań normowych do nasypów drogowych

Parametr	Wymagania normy [12]	Wartości dla mieszanki popiołowo-żużlowej
Uziarnienie:		
a) zawartość frakcji piaskowo-żwirowej [%]	≥ 35	65,9
b) zawartość cząstek $\leq 0,075$ mm [%]	≤ 75	42
Wskaźnik uziarnienia	≥ 3	10,6
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	$\geq 1,0$	146
Pęcznienie liniowe [%] przy obciążeniu siłą 22 N	$< 0,5$	0,53
Kąt tarcia wewnętrznego [°]	≥ 20	34,0
Wskaźnik nośności [%] po 4 dobach nasączenia wodą przy obciążeniu siłą 22 N	≥ 10	20,4

**Rys. 5.** Wpływ obciążenia na pęcznienie liniowe

przy większym obciążeniu siłą 44 N pęcznienie było nieznaczne ($p = 0,10\%$). Biorąc to pod uwagę, a także stosunkowo dużą zawartość cząstek drobnych ($d < 0,075$ mm – 42% i $d < 0,02$ mm – 14%) można dopuścić do stosowania przedmiotowej mieszanki na dolne warstwy nasypów w miejscach suchych lub izolowanych od wody.

5. Podsumowanie

W oparciu o analizę wyników przeprowadzonych badań mieszanki popiołowo-żużlowej ze składowiska Elektrociepłowni Kraków EDF można stwierdzić, że może ona stanowić antropogeniczny grunt budowlany przydatny do formowania nasypów drogowych. Jest to materiał gruboziarnisty na pograniczu drobnoziarnistego o ogólnie korzystnych właściwościach geotechnicznych. Zróżnicowanie uziarnienia powoduje, że jest to grunt kilkufrakcyjny, dobrze zagęszczalny przy wilgotności zbliżonej do optymalnej. Przy dużym wskaźniku zagęszczenia ($I_s = 0,97$) i wilgotności optymalnej charakteryzuje się dużą wytrzymałością na ścinanie i nośnością. Może być stosowany do budowy nasypów drogowych na dolne warstwy poniżej strefy przemarzania, w miejscach suchych lub izolowanych od wód gruntowych i powierzchniowych.

Zróżnicowanie parametrów mieszanki (wilgotność, uziarnienie) powoduje, że każdorazowo należy zbadać właściwości geotechniczne pobranej partii materiału dla prawidłowej oceny jego przydatności do projektowanego zastosowania. Technologia budowy nasypu (grubość warstw, wilgotność, rodzaj maszyny zagęszczającej, liczba przejazdów po jednym śladzie) powinna zostać określona na podstawie odpowiednich zaprogramowanych badań na nasypie próbnym – poligonie doświadczalnym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A., Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 1/2005, str. 23–42
- [2] Gruchot A., Utylizacja odpadów powęglowych i poenergetycznych do celów inżynierskich jako czynnik kształtowania i ochrony środowiska, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Rozprawy*, 410/2016
- [3] Hausteijn E., Quant B., Charakterystyka wybranych właściwości mikrosfer – frakcji popiołu lotnego – ubocznego produktu spalania węgla kamiennego, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27, 3/2011, str. 95–111
- [4] Hycnar J., Jarema-Suchorowska S., Nazewnictwo ubocznych produktów spalania, *Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Popioły z energetyki*, Zakopane, 2004, str. 183–195
- [5] Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M., *Energetyka a ochrona środowiska*, WNT, 1987
- [6] Madawala Liyanage Duminda Jayaranjan, Eric D. van Hullebusch, Ajit P. Annachhatre: Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews Environmental Science and Bio-Technology*, 13, 4/2014, str. 467–486
- [7] Myślińska E., *Laboratoryjne badania gruntów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998
- [8] *Ochrona Środowiska. Informacje i opracowania statystyczne*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2016
- [9] Pisarczyk S., *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004
- [10] PN-EN ISO 14688-1:2006. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [11] PN-EN ISO 14688-2:2006. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [12] PN-S-02205:1998. *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [13] Wiłun Z., *Zarys geotechniki*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000
- [14] Zawisza E., *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania gruntych odpadów powęglowych popiołami lotnymi*, *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Rozprawy*, 280/2001
- [15] Żygadło M., Woźniak M., Obserwacje zmian właściwości popiołów powęglowych w procesach wietrzeniowych, *Energetyka i Ekologia* 11/2009, str. 771–775