



# Wykorzystanie ubocznych produktów spalania jako stabilizatora do wzmacniania gruntów organicznych

*Jarosław Filipiak*  
*Politechnika Koszalińska*

## 1. Wstęp

Głównym źródłem pozyskiwania energii na Świecie ale również w Polsce jest produkcja oparta głównie na paliwach kopalnych (węgiel, gaz ziemny, ropa naftowa). W Polsce z elektrowni spalających węgiel kamienny lub brunatny pozyskujemy około 90% energii. Pod względem wykorzystania węgla, jako surowca do produkcji energii elektrycznej Polska zajmuje drugie miejsce na Świecie [1].

**Tabela 1.** Udział energii elektrycznej w wyniku spalania węgla w 2008–2009 [1]

**Table 1.** The share of electric energy from burning by coal in 2008–2009 [1]

Kraj	Udział, [%]	Kraj	Udział, [%]	Kraj	Udział, [%]
RPA	93	Kazachstan	70	Maroko	55
<b>Polska</b>	<b>90</b>	Indie	69	Grecja	55
Chiny	79	Izrael	63	USA	45
Australia	76	Czechy	56	Niemcy	44

Według prognoz rządowych zapotrzebowanie na energię elektryczną zwiększy się średnio o połowę do roku 2030. W tym czasie prawdopodobnie paliwa stałe zdominują przemysł energetyczny, zaspokajając 85% wzrostu światowego zapotrzebowania na energię elektrycz-

ną. Jednak, uwzględniając nawet 60% udział procesu spalania węgla w produkcji energii elektrycznej w 2030 roku, ilość spalanego węgla w skali roku przekroczy 10 mld ton [6]. Pamiętać należy, że nawet najbardziej optymistyczne prognozy na rzecz energii odnawialnej nie przekreślają jednak roli węgla w wytwarzaniu energii.

Efektym ubocznym spalania węgla w elektrociepłowniach i elektrowniach jest duża ilość odpadów paleniskowych głównie popiołów lotnych i żużła, tzw. ubocznych produktów spalania (ups). Po spaleniu jednej tony węgla pozostaje około 250 kg popiołów i żużli [7]. Szacuje się, że co roku na świecie przybywa około 480 mln ton ubocznych produktów spalania [6].

W Polsce rocznie powstaje ok. 20 mln ton ups, z czego ok. 80% podlega utylizacji. Szacuje się, że na składowiskach leży nawet 400 mln ton tego typu odpadów [13]. Stan taki wywołuje negatywne skutki w środowisku naturalnym, dlatego zagospodarowanie tych odpadów, zostało zaliczone do priorytetów polityki ekologicznej państwa. Różne gatunki węgla oraz nowe technologie spalania węgla i odsiarczania spalin powodują, że popioły lotne mają zróżnicowane właściwości, co ma z kolei znaczenie dla wykorzystania gospodarczego.

Odpowiednio przetworzone i wykorzystane ups stanowią unikatowy i uniwersalny materiał, który wciąż czeka na pełne wykorzystanie w wielu dziedzinach gospodarki, z budownictwem drogowym na czele. Wykorzystanie tak ogromnej ilości materiału przyniosłoby znaczne oszczędności dla gospodarki i ogromne korzyści dla środowiska naturalnego. Prawidłowe zagospodarowanie ups wymaga odpowiedniej wiedzy na temat ich właściwości oraz możliwości zastosowania. Badania nad właściwościami ups wyznaczyły wiele kierunków ich zagospodarowania [8]. Są to m.in.: stabilizacja gruntów i budowa dróg 23%, produkcja spoiw 14%, klinkieru 22%, betonu 33%, kruszyw sztucznych 2,0% oraz materiały budowlane 5%, a także różne zastosowania w rolnictwie, hutnictwie i górnictwie 1,0% [13].

Niestety ilość utylizowanych odpadów energetycznych w Polsce a zwłaszcza na świecie jest ciągle nie zadawalająca. Należy tu przypomnieć iż jednym z podstawowych atutów ups są zdolności do wiązania z wodą i związkami wapnia, dzięki czemu są cennym składnikiem cementów i betonów.

## 2. Akty prawne

Wykorzystanie popiołów lotnych jest uwarunkowane spełnieniem wymagań w zakresie parametrów jakościowych zależnych od poszczególnych zastosowań. Główne ich zagospodarowanie przejął przemysł materiałów budowlanych, chociaż w ostatnich latach coraz większe znaczenie zaczyna odgrywać również wykorzystanie popiołów lotnych w drogownictwie [10, 11].

Wymagania stawiane popiołom lotnym stosowanym jako składnik cementu zawarte są w normie: *PN-EN 197-1:2007*, zaś wymagania dla popiołu lotnego użytego jako dodatek do betonu określa norma *PN-EN 450-1:2012* Zasady stosowania popiołów lotnych w produkcji betonu zostały podane w normie *PN-EN 206-1:2003*.

Natomiast *PN-S-96035: Drogi samochodowe. Popioły lotne*, oraz *PN-S-06103:199:7 Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego* i *PN-S-02205:1998: Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*, to tylko trzy z kilkunastu norm stosowanych w drogownictwie.

Wymagania dla popiołów lotnych stosowanych do mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym określa norma *PN-EN 14227: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja: Część 3 i 4: Mieszanki na popiołach lotnych i Popioły lotne do mieszanek*.

Należy podkreślić, iż pomimo wieloletniej tradycji stosowania popiołów lotnych w budownictwie i drogownictwie, wielu niepodważalnych zalet mieszanek cementowo-popiołowych, a także bogatego piśmiennictwa poświęconego ocenie jakości popiołów lotnych i ich cech, nadal pozostają wątpliwości co do precyzyjnego określenia optymalnych kierunków ich wykorzystania. Prowadzone badania oparte na standardach Europejskiej Agencji Chemikaliów (ECHA) potwierdzają naukowo i laboratoryjnie, że są one bezpieczne, nie zagrażają zdrowiu ludzi i zwierząt, nie stanowią też niebezpieczeństwa dla środowiska naturalnego. Niska zawartość pierwiastków promieniotwórczych w odpadach paleniskowych pozwala na szerszy zakres ich wykorzystania a w przypadku stosowania odpadów do podszadzki wyrobisk górniczych, zawartość pierwiastków promieniotwórczych nie odgrywa istotnej roli [9]. W świetle tej wiedzy oraz obowiązujących nowych regulacji prawnych i idących

za tym wymagań w zakresie ochrony środowiska, utylizacja popiołów stwarza nowe kierunki utylizacji.

Aktualnie w wielu ośrodkach prowadzone są badania w kierunku nowych zastosowań popiołów z energetyki. Jednym z takich pomysłów jest wykorzystanie ups w metodzie głębokiego mieszania (deep soil mixing) realizowany w Katedrze Geotechniki Politechniki Koszalińskiej.

W pracy przedstawiono metodologię i wyniki badań wzmocnienia gruntów organicznych mieszanką cementowo-popiołową. Artykuł stanowi rozwinięcie publikacji przedstawionej na X Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej [5]. W artykule podano klasyfikację popiołów lotnych, oraz skład chemiczny z elektrowni Konin. W zasadniczej części pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, których celem było określenie zmiany wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, gruntów wzmocnionych popiołem.

### 3. Klasyfikacja popiołów lotnych i skład chemiczny

Ze względu na różnice w składzie chemicznym i fazowym odpadów energetycznych, dokonano jednolitej klasyfikacji popiołów. Za kryterium klasyfikacji przyjęto stosunki ogólnej zawartości krzemu ( $\text{SiO}_2$ ), glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i wapnia ( $\text{CaO}$ ), dzieląc popioły na krzemianowe (k), glinowe (g) i wapniowe (w) (tabela 2). Skład chemiczny popiołu uzyskiwanego w danej elektrowni czy elektrociepłowni jest bardzo zróżnicowany, jest on bezpośrednio pochodną jakości użytkowanego przez zakład węgla [15].

**Tabela 2.** Podział popiołów lotnych na kategorie w zależności od składu chemicznego (według BN-79/6722-09) [15]

**Table 2.** Breakdown of fly ash into categories depending on their chemical composition (according to standard BN-79/66722-09) [15]

Rodzaj popiołu	symbol	Zawartość [%]			
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{SO}_3$
Krzemianowy	k	>40	<30	≤10	<4
Glinowy	g	>40	≥30	≤10	<4
Wapniowy	w	>40	<30	>10	≥3

**Tabela 3.** Skład chemiczny popiołu lotnego z Elektrowni Konin [2]**Table 3.** The chemical composition of fly ash from the power plant Konin [2]

składnik	wielkość [%]
SiO <sub>2</sub>	47,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,54
CaO	31,83
CaO wolne	10,62
MgO	0,12
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20
K <sub>2</sub> O	5,98

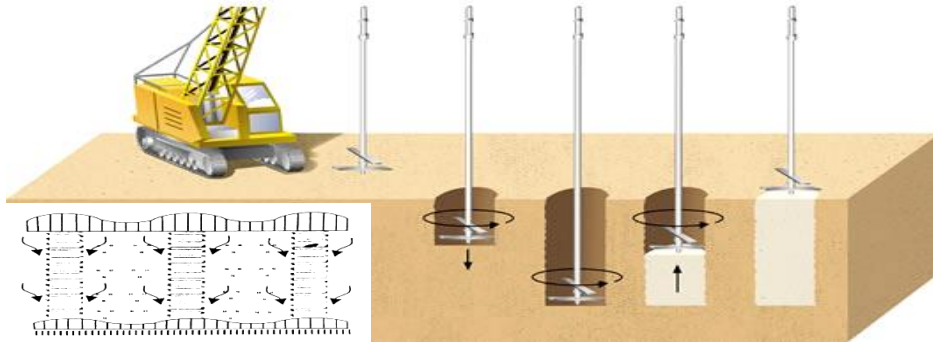
Z powyższego zestawienia wynika, że popiół z elektrowni Konin można zaliczyć do popiołów wapniowych.

Popioły lotne można także podzielić na dwie grupy w zależności od zawartości tlenku wapnia CaO. Pierwsza grupa obejmuje tzw. popioły niskowapniowe, składające się przede wszystkim ze szkliwa glinokrzemianowego. W tych popiołach, z faz krystalicznych w trakcie chłodzenia krystalizuje silimanit, mulit i kwarc. Tlenki żelaza występują tu w postaci hematytu lub magnetytu. Uważa się, że wysoka zawartość faz krystalicznych w tego rodzaju popiele obniża jego aktywność pucolanową (*zdolność do wiązania*). Druga grupa dotyczy tzw. popiołów wysokowapniowych, o bardziej złożonym składzie mineralnym. W tych popiołach faza szklista ma inny skład chemiczny w porównaniu z popiołem niskowapniowym. W popiołach wysokowapniowych podstawowymi składnikami krystalicznymi są: kwarc, wolny CaO, anhydryt, glinian trójwapniowy, siarczano-glinian czterowapniowy. Są to składniki reaktywne w stosunku do wody i nadają popiołom właściwości wiążące [3].

#### **4. Zastosowanie popiołów lotnych do wzmocnienia gruntów słabych**

Popioły mogą być wykorzystywane do stabilizacji gruntów spoi-  
stych o dużym stopniu plastyczności, lub gruntów organicznych. Dodatek popiołu lotnego zmienia strukturę gruntu powodując w efekcie wzrost wytrzymałości na ścinanie i zmniejszenie odkształcalności. Jedną z nowoczesnych metod wzmocniania gruntu jest metoda głębokiego miesza-

nia. Polega ona na tym, że rodzimy grunt miesza się z jednym lub z kilkoma stabilizatorami, często z cementem, wapnem lub innymi dodatkami, np. popiołami [14]. Wzmacnianie gruntów można realizować poprzez stabilizację masową do głębokości 5 m oraz w postaci pionowych kolumn nazywanych popularnie kolumnami cementowo-wapiennymi (rysunek 1).



**Rys. 1.** Zasada wykonywania kolumn C-W oraz idea współpracy kolumny z otaczającym gruntem [4, 17]

**Fig. 1.** Soil mixing proces and the geo-mechanical design philosophy for deep stabilisation [4, 17]

Idea głębokiej stabilizacji polega na wytworzeniu kolumny, która pod obciążeniem zewnętrznym współpracuje z niestabilizowanym otaczającym gruntem, co oznacza, iż część obciążenia jest przenoszona przez kolumnę, a część przez otaczający grunt. Z praktyki inżynierskiej wynika, iż generalnie dobrą współpracę z otaczającym gruntem zapewniają kolumny tzw. miękkie do półtwardych (semi-hard), których wytrzymałość na ściskanie w warunkach bez odwodnienia nie przekracza 300 kPa.

## 5. Badanie wytrzymałości

W Laboratorium Katedry Geotechniki Politechniki Koszalińskiej wykonano serię badań laboratoryjnych na próbkach gruntów organicznych stabilizowanych mieszanką cementowo-popiołową. Głównym celem prowadzonych badań było określenie zmiany wytrzymałości wzmacnianego gruntu na jednoosiowe ściskanie w zależności od rodzaju

i ilości użytego stabilizatora. Wzmocnieniu poddano grunty o różnej zawartości części organicznych pobrane z okolic Koszalina i Szczecinka. Badania zostały zaplanowane w taki sposób, aby przy przyjęciu różnych proporcji poszczególnych składników i ilości stabilizatora można było uzyskać racjonalne, a zarazem skuteczne ulepszenie badanych gruntów. Grunty stabilizowano mieszaniną cementu hutniczego CEM III/A 32,5 i popiołu lotnego z elektrowni Konin.

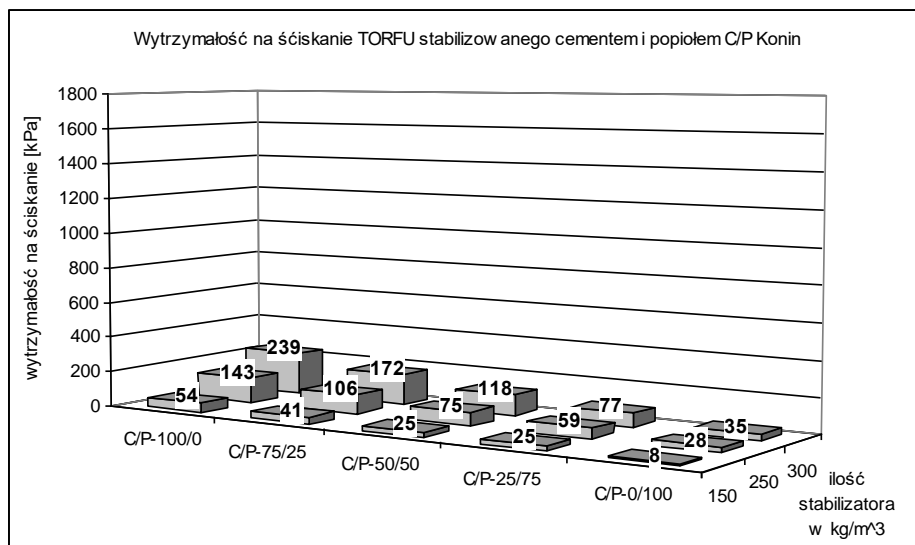
Do badań wytypowano trzy grunty o różnej zawartości części organicznych: torf, namuł gliniasty i kredę jeziorną. Badanie właściwości fizycznych przeprowadzono standardowymi metodami zgodnie z PN [16], a wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Zestawienie podstawowych cech fizycznych gruntów organicznych zakwalifikowanych do badań stabilizacji

**Table 3.** Properties of the test soils

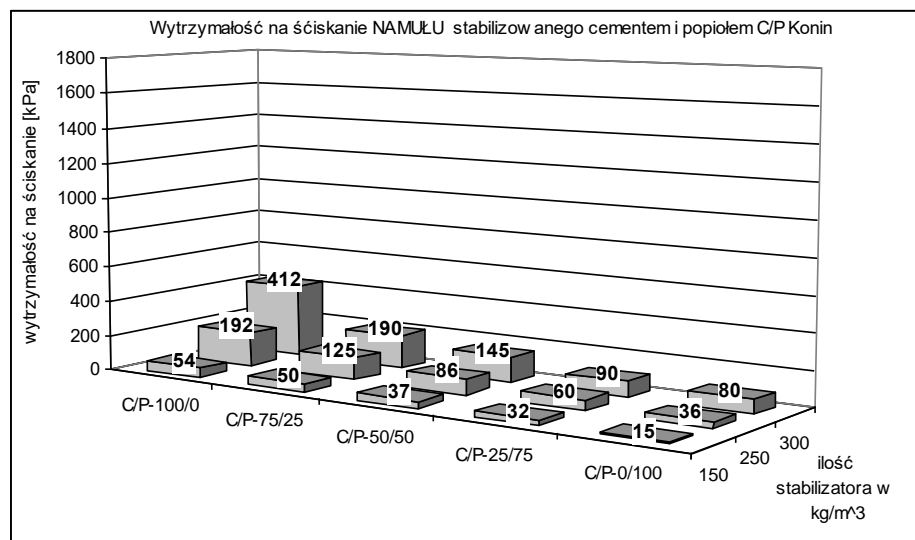
rodzaj gruntu	barwa	wilgotność [%]	gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	klasa zawartości węglanów	zawartość części organicznych I <sub>om</sub> [%]
torf	czarna	484–581 w <sub>śr</sub> = 531	1,08–1,15 ρ <sub>śr</sub> = 1,1	III	57,7–69,5 I <sub>omśr</sub> = 64,6
namuł gliniasty	brunatna	151–176 w <sub>śr</sub> = 164	1,32–1,49 ρ <sub>śr</sub> = 1,4	V	19,1–21,2 I <sub>omśr</sub> = 20,1
kreda jeziorna	jasno-szara	78–93 w <sub>śr</sub> = 86	1,41–1,58 ρ <sub>śr</sub> = 1,5	V	8,1–8,9 I <sub>omśr</sub> = 8,4

Rodzaj, ilość spoiwa, proporcje składników, sposób mieszania, przechowywania gruntów wzmocnionych, wymiary foremek oraz sposób badania i oznaczania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przeprowadzono według autorskiej metody [5].



**Rys. 2.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego torfu

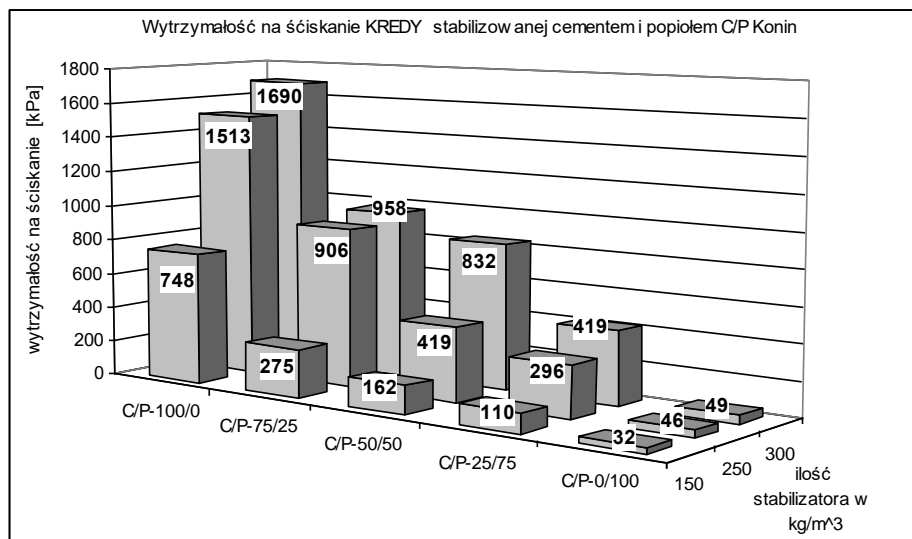
**Fig. 2.** Compression strength of stabilized peat



**Rys. 3.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego namułu gliniastego

**Fig. 3.** Compression strength of stabilized clayey mud





**Rys. 4.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie stabilizowanej kredy jeziornej  
**Fig. 4.** Compression strength of stabilized bog lime

Wyniki badań wzmocnionych prób torfu, namułu gliniastego i kredy jeziornej, stabilizowanych mieszanką cementowo-popiołową przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2, 3 i 4. Wszystkie próbki wykazują tą samą zmianę wytrzymałości w zależności od ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu. Na wykresach widać wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem cementu w mieszance. Ważnym aspektem przeprowadzonych badań jest fakt, iż w przypadku zastosowania tej samej ilości cementu, dodatek popiołu do mieszanki powoduje wzrost wytrzymałości na ścinanie. Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że mieszanki popiołowo cementowe można z powodzeniem stosować do stabilizacji gruntów organicznych. Należy jednakże pamiętać o różnorodności gruntów organicznych. Dlatego bezwzględnie konieczne jest aby przed wzmocnianiem gruntów organicznych wykonać badania pilotażowe w celu określenia skuteczności metodyki wzmocnienia innych gruntów organicznych.

## 6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Popioły lotne z elektrowni Konin wykazują właściwości *pucolanowe* w stosunku do gruntów organicznych z okolic Koszalina i Szczecinka.
2. Wykorzystanie popiołów lotnych z elektrowni Konin może być stosowane do stabilizacji torfu, namułu gliniastego i kredy jeziornej z okolic Koszalina i Szczecinka.
3. Zastosowanie popiołów lotnych do wzmocnienia podłoża gruntowego stanowi kolejny alternatywny krok w kierunku zagospodarowania ubocznych produktów spalania (ups).
4. Przy średnicy kolumny wynoszącej 0,5 m, na każdy metr wykonanej kolumny wykorzysta się 30 kg popiołu lotnego.
5. Zastosowanie np. mieszanki C/P 25/75/300 dają większą lub taką samą wytrzymałość na ściskanie jak dla mieszanki 50/50/250, co w znacznym stopniu zarówno redukuje ilość ups jak również zmniejsza zużycie cementu.

## Literatura

1. **Coal Statistics, World Coal Association:**  
[www.worldcoal.org/resources/coal-statistics](http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics)
2. **Chudek M., Hycnar J, Janiczek S., Plewa F.:** *Węgiel brunatny*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Arkady 1999.
3. **Czarnecki L.:** *Chemia w budownictwie*. Arkady 1996.
4. EuroSoilStab: Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils. 2004.
5. **Filipiak J.:** *Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 13. 2011.
6. **Hycnar J.:** *Elektroenergetyka*, nr 01.09, s. 48–53.
7. **Karwowska E., Łebkowska M., Tabernacka A., Andrzejewska D.:** *Eliminacja metali ciężkich z popiołów z użyciem roztworów ługujących zawierających bakterie utleniające siarkę lub bakterie produkujące, biologiczne substancje powierzchniowo czynne*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 13. 2011.
8. **Łukasik S.:** *Problemy składowania i zagospodarowania żużli I popiołów*. Sesja jubileuszowa ITB 2007 r.

9. **Olkuski T., Stala-Szlugaj K.:** *Pierwiastki promieniotwórcze w węglu oraz w produktach odpadowych powstających podczas jego spalania.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 11. 2009.
10. **Pachowski J.:** *Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym,* WKiŁ Warszawa 1976.
11. **Piecuch T.:** *Wskazanie możliwości utylizacji pyłów lotnych MEC Kołobrzeg,* Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska PK nr 11, Koszalin 1996.
12. **Serbeńska A.:** *Szare na złote.* portal drogowy 2010.
13. **Szczygielski T.:** *Wykorzystanie ubocznych produktów spalania jako materiałów alternatywnych w inżynierii lądowej w aspekcie zrównoważonego rozwoju regionalnego.* Wrocław 2010.
14. **Werno M.:** *Opracowanie podstaw stosowania technologii wzmocnienia gruntu za pomocą kolumn cementowo-wapiennych dla potrzeb budownictwa drogowego.* Wydawnictwa wewnętrzne Instytutu Morskiego, Gdańsk 1999.
15. **Quant B.:** *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej.* Budownictwo Wodne nr 44, 1997.
16. Norma PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
17. strony internetowe firmy: WWW.HAYWARDBAKER.com

## **Application of Combustion By-products as a Stabilizer for Organic Soils**

### **Abstract**

The paper presents organic soils from Koszalin, Szczecinek area: peat, mud and bog lime have been tested regarding their usefulness for stabilisation using cement-fly ash admixture. Physical soil properties have been examined as well as compressive strength. The admixture contains 0/100, 75/25, 50/50, 25/75, 100/0, cement/fly ash and it has been added at amounts 150, 250 i 300 kg/m<sup>3</sup>. Used to stabilize fly ash from power plants Konin. Stabilized soil samples have been cured in water for 28 days. Presents the main sources of fly ashes from, as well as the principal directions of their utilization. The quality characteristics of fly ashes is discussed. The main tendencies in fly ashes utilization are pointed out. The compressive strength is presented in Figs. 3, 4 and 5.